

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Российский университет дружбы народов имени
Патриса Лумумбы»

На правах рукописи

Московец Оксана Олеговна

**КОМПЛЕКСНОЕ ЦИФРОВОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ
ОРТОДОНТИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ**

3.1.7. Стоматология

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора медицинских наук

Научный консультант:
Апресян Самвел Владиславович,
доктор медицинских наук, профессор

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	27
1.1. Диагностика в ортодонтии, аналоговые и цифровые методы	32
1.1.1. Эстетика лица: понятие и методы исследования.....	32
1.1.2. Биометрические методы исследования	36
1.1.3. Рентгенологические методы исследования.....	39
1.1.4. Функциональные методы исследования	43
1.1.5. Изучение состояния тканей пародонта.....	46
1.2. Цифровые методы планирования ортодонтического лечения.....	50
1.3. Цифровые и аналоговые методы ортодонтического лечения	62
1.4. Визуализация планируемого лечения пациенту.....	75
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	87
2.1. Материалы и методы анализа научных информационных источников...	88
2.2 Материал и метод разработки цифрового способа фотометрического анализа	101
2.2.1. Материал для разработки цифрового способа фотометрического анализа	101
2.2.2. Методика разработки цифрового фотометрического анализа	102
2.2.3. Методика оценки диагностической эффективности цифрового фотометрического анализа	107
2.3 Материал и метод разработки цифрового способа биометрического анализа зубных рядов.....	117
2.3.1. Материал для разработки цифрового способа биометрического анализа зубных рядов	119

2.3.2. Методика разработки цифрового способа биометрического анализа зубных рядов	120
2.3.3. Методика оценки диагностической эффективности цифрового способа биометрического анализа зубных рядов	124
2.4 Материал и метод разработки цифрового способа цефалометрического анализа	135
2.4.1. Материал для разработки цифрового способа цефалометрического анализа	137
2.4.2. Методика разработки цифрового способа цефалометрического анализа	138
2.4.3. Методика оценки диагностической эффективности цифрового способа цефалометрического анализа	144
2.5. Материал и метод разработки цифрового способа анализа компьютерной томографии.....	152
2.5.1. Материал для разработки цифрового способа анализа компьютерной томографии.....	153
2.5.2. Методика разработки цифрового способа анализа компьютерной томографии.....	154
2.5.3. Методика оценки диагностической эффективности цифрового способа анализа компьютерной томографии	159
2.6. Материал и метод разработки способа ортодонтического лечения дистальной окклюзии с применением позиционирующих окклюзионных накладок и конструкционного материала для их аддитивного производства	168
2.6.1. Материал и метод разработки способа ортодонтического лечения дистальной окклюзии с применением позиционирующих окклюзионных накладок.....	168

2.6.2. Материал и метод разработки конструкционного материала для аддитивного производства позиционирующих окклюзионных накладок	172
2.7. Материал и методы оценки клинической эффективности предложенного способа лечения дистальной окклюзии.....	175
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	204
3.1. Результаты разработки цифрового способа фотометрического анализа и оценка его диагностической эффективности.....	204
3.1.1. Результаты разработки цифрового способа фотометрического анализа	204
3.1.2. Результаты оценки диагностической эффективности цифрового фотометрического анализа	206
3.2. Результаты разработки цифрового способа биометрического анализа зубных рядов и оценка его диагностической эффективности	212
3.2.1. Результаты разработки цифрового способа биометрического анализа зубных рядов	212
3.2.2. Результаты оценки диагностической эффективности цифрового способа биометрического анализа зубных рядов.....	215
3.3. Результаты разработки цифрового способа цефалометрического анализа и оценка его диагностической эффективности.....	222
3.3.1. Результаты разработки цифрового способа цефалометрического анализа	222
3.3.2. Результаты оценки диагностической эффективности цифрового способа цефалометрического анализа.....	225
3.4. Результаты разработки цифрового способа анализа компьютерной томографии и оценка его диагностической эффективности	231
3.4.1. Результаты разработки цифрового способа анализа компьютерной томографии.....	231

3.4.2. Результаты оценки диагностической эффективности цифрового анализа компьютерной томографии	233
3.5. Результаты оценки клинической эффективности предложенного способа лечения дистальной окклюзии	240
3.5.1. Результаты изменения клинических проявлений дисфункции ВНЧС	240
3.5.2. Результаты КЛКТ-анализа ВНЧС	242
3.5.3. Результаты электромиографического исследования	243
3.5.4. Результаты морфологической коррекции окклюзии.....	245
3.5.5. Результаты оценки стабильности позиционирующих окклюзионных накладок.....	246
3.6. Результаты разработки цифрового модуля моделирования позиционирующих окклюзионных накладок и оценка его точности и воспроизводимости	248
3.6.1. Результаты разработки цифрового модуля моделирования позиционирующих окклюзионных накладок	248
3.6.2. Результаты оценки точности и воспроизводимости цифрового моделирования позиционирующих окклюзионных накладок	250
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ОРТОДОНТИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ	257
4.1. Материал и методы разработки интегрированной цифровой системы планирования ортодонтического лечения.....	257
4.2. Материал и методы оценки диагностической точности, воспроизводимости и временной эффективности разработанной цифровой системы планирования ортодонтического лечения	263
4.2.1. Оценка диагностической точности интеграции модулей программы.	264
4.2.2 Оценка воспроизводимости работы цифровой системы	265

4.2.3 Оценка эффективности автоматического формирования медицинской документации	267
4.2.4 Оценка эффективности автоматического формирования презентации плана лечения.....	268
4.2.5 Анкетирование врачей-ортодонт по удобству работы с программой	269
4.2.6 Анкетирование пациентов по восприятию презентации плана лечения	270
4.2.7 Оценка временной эффективности цифровой системы.....	270
4.2.8 Статистическая обработка данных	271
4.3. Результаты оценки эффективности разработанной цифровой системы планирования ортодонтического лечения.....	272
4.3.1. Результаты оценки диагностической точности интеграции модулей программы	273
4.3.2 Результаты оценки воспроизводимости работы цифровой системы ...	275
4.3.3 Результаты оценки эффективности автоматического формирования медицинской документации	276
4.3.4 Результаты оценки эффективности автоматического формирования презентации плана лечения	278
4.3.5 Результаты анкетирования врачей-ортодонт по удобству работы с программой	280
4.3.6 Результаты анкетирования пациентов по восприятию презентации плана лечения.....	281
4.3.7 Результаты оценки временной эффективности цифровой системы.....	283
4.3.8 Результаты статистической обработки данных	285
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	287

ВЫВОДЫ	305
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ	309
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	313
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	315

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост распространенности зубочелюстных аномалий среди пациентов различных возрастных групп, что делает проблему диагностики и планирования ортодонтического лечения одной из наиболее значимых в современной стоматологии. По данным отечественных и зарубежных авторов, распространенность аномалий зубочелюстной системы среди детей и подростков достигает 60–70%, а среди взрослого населения сохраняется на стабильно высоком уровне, занимая одно из ведущих мест в структуре стоматологической патологии после кариеса и заболеваний пародонта (Персин, 2020; Цветкова, 2023; Lagan et al., 2017; Balić et al., 2022).

Современное ортодонтическое лечение уже не ограничивается исключительно устранением морфологических нарушений зубных рядов. На первый план выходит достижение гармоничного функционального и эстетического результата, обеспечивающего не только нормализацию окклюзии, но и улучшение качества жизни пациента, его социальной адаптации и психоэмоционального состояния (Налбандян и др., 2018; Токаревич и др., 2023; Lepilin et al., 2019; Okićić et al., 2023). В этой связи существенно возрастает значение точной диагностики и индивидуализированного планирования лечения, основанного на комплексной оценке морфологических, функциональных и эстетических параметров зубочелюстно-лицевой системы.

Традиционные методы диагностики в ортодонтии, включающие анализ гипсовых моделей, ручную цефалометрию, фотометрические исследования и антропометрические измерения, несмотря на широкое распространение, обладают рядом ограничений. Среди них — высокая трудоемкость, вероятность субъективных ошибок, зависимость результатов от квалификации

оператора, а также ограниченные возможности интеграции диагностических данных в единый цифровой протокол лечения (Доменюк и др., 2015; Попова, 2020; Westerlund et al., 2015; Felter et al., 2018). Кроме того, использование аналоговых методик затрудняет воспроизводимость результатов и усложняет процесс междисциплинарного взаимодействия специалистов.

Развитие цифровых технологий в стоматологии привело к появлению принципиально новых подходов к диагностике и планированию ортодонтического лечения. Внедрение внутриротового сканирования, цифровой фотометрии, трехмерной цефалометрии, конусно-лучевой компьютерной томографии, CAD/CAM-систем и технологий аддитивного производства позволило существенно повысить точность диагностики, сократить временные затраты и улучшить прогнозируемость результатов лечения (Апресян и др., 2020; Жмырко, 2021; Mangano et al., 2017; Lee et al., 2022). Использование цифровых методов обеспечивает возможность комплексной визуализации клинической ситуации, проведения виртуального моделирования перемещения зубов и оценки предполагаемого результата еще до начала активного лечения.

Особую актуальность цифровые методы приобретают при лечении взрослых пациентов, у которых ортодонтическая патология часто сочетается с вторичной адентией, заболеваниями пародонта, нарушениями функции височно-нижнечелюстного сустава и ранее выполненными ортопедическими реставрациями (Арсенина и др., 2023; Попова, 2022; Wada et al., 2015; Alsulaimani et al., 2023). В подобных клинических ситуациях требуется максимально точное планирование каждого этапа лечения с учетом анатомических и функциональных особенностей пациента. Цифровые технологии позволяют получать объективные диагностические данные, минимизировать риск ошибок и повысить безопасность ортодонтического вмешательства.

Несмотря на активное развитие цифровой ортодонтии, в настоящее время отсутствует единая интегрированная система комплексного цифрового планирования, объединяющая данные фотометрии, внутриротового сканирования, цефалометрии, компьютерной томографии и функциональной диагностики в единую диагностическую платформу. Имеющиеся программные решения в большинстве случаев ориентированы на выполнение отдельных задач и не обеспечивают полноценной автоматизации аналитических процессов и формирования единого цифрового протокола ведения пациента (Чхиквадзе и др., 2020; Габдрафиков, 2021; Panayi et al., 2023; Londono et al., 2023).

Дополнительный научный интерес представляет внедрение технологий искусственного интеллекта и автоматизированной обработки диагностических данных. Современные исследования демонстрируют высокую эффективность алгоритмов машинного обучения при автоматическом определении цефалометрических ориентиров, анализе цифровых моделей зубных рядов и прогнозировании результатов ортодонтического лечения (Kim et al., 2020; Vaid, 2021; Subramanian et al., 2022; Surendran et al., 2024). Однако данные направления пока остаются недостаточно изученными и требуют дальнейшей научной разработки и клинической апробации.

Таким образом, разработка и научное обоснование системы комплексного цифрового планирования ортодонтического лечения, основанной на интеграции современных методов цифровой диагностики, является актуальной научной и практической задачей современной ортодонтии. Реализация подобного подхода позволит повысить точность диагностики, воспроизводимость результатов, эффективность лечебного процесса и качество оказания ортодонтической помощи пациентам.

Основанием для выполнения настоящего исследования послужили современные тенденции цифровизации стоматологии, необходимость

совершенствования методов диагностики зубочелюстных аномалий и потребность в создании интегрированной цифровой системы планирования ортодонтического лечения.

Цель исследования

Повышение эффективности планирования ортодонтического лечения пациентов с применением современных цифровых технологий.

Задачи исследования

1. Провести анализ отечественных и зарубежных научных источников с целью выявления наиболее информативных и клинически значимых методов диагностики аномалий зубочелюстной системы и обоснования направлений их цифровой трансформации при планировании ортодонтического лечения.

2. Разработать метод цифрового анализа портретных фотографий пациента и провести оценку его диагностической эффективности в сравнении с традиционными антропометрическими методами.

3. Разработать метод цифрового анализа внутриротовых оптических слепков зубных рядов пациента и провести сравнительную оценку его точности с результатами мануальных измерений гипсовых диагностических моделей.

4. Разработать метод цифровой цефалометрической обработки телерентгенограмм в прямой и боковой проекциях и провести сравнительную оценку его точности и воспроизводимости с классическими методами ручного трассирования.

5. Оценить диагностические возможности цифрового анализа данных компьютерной томографии в ортодонтическом планировании и определить его вклад в повышение точности диагностики зубочелюстных аномалий.

6. Разработать способ ортодонтического лечения дистальной окклюзии с применением позиционирующих окклюзионных накладок, изготовленных с

использованием цифровых технологий, а также разработать конструкционный материал для их аддитивного производства.

7. Оценить клиническую эффективность предложенного способа лечения дистальной окклюзии на основании функциональных и морфологических показателей.

8. Разработать метод цифрового моделирования позиционирующих окклюзионных накладок в терапевтическом положении нижней челюсти и провести оценку его точности и воспроизводимости.

9. Разработать интегрированную компьютерную программу для комплексной цифровой диагностики стоматологического пациента и планирования ортодонтического лечения с возможностью автоматического формирования медицинской документации.

10. Провести оценку диагностической точности, воспроизводимости и временной эффективности разработанной цифровой системы планирования ортодонтического лечения.

Научная новизна исследования

Впервые на основании анализа отечественных и зарубежных источников научно обоснована структура комплексного цифрового протокола ортодонтической диагностики, включающего фотометрический анализ лица, биометрию цифровых моделей зубных рядов, цифровую цефалометрию, анализ данных КЛКТ и оценку функционально значимых параметров зубочелюстной системы.

Разработан цифровой способ фотометрического анализа портретных фотографий пациента, позволяющий проводить объективную оценку линейных и угловых параметров лица с высокой воспроизводимостью результатов. Средняя абсолютная ошибка линейных измерений составила $0,74 \pm 0,31$ мм, а угловых измерений $0,82 \pm 0,37^\circ$, при значениях ICC 0,91–0,98 и сокращении времени анализа с $64,7 \pm 8,9$ до $15,2 \pm 2,4$ мин ($p < 0,001$).

Разработан цифровой способ биометрического анализа внутриротовых оптических слепков зубных рядов, обеспечивающий точное измерение параметров зубов и зубных дуг без изготовления гипсовых диагностических моделей. Средняя абсолютная ошибка линейных измерений составила $0,18 \pm 0,07$ мм, ICC — 0,94–0,99, а время исследования сократилось с $66,3 \pm 9,4$ до $15,6 \pm 2,7$ мин ($p < 0,001$).

Разработан цифровой способ цефалометрической обработки телерентгенограмм в прямой и боковой проекциях, позволяющий повысить воспроизводимость ручного трассирования и снизить влияние оператора на результат. Средняя абсолютная ошибка линейных измерений составила $0,42 \pm 0,16$ мм, а угловых измерений $0,58 \pm 0,21^\circ$, ICC — 0,93–0,99, при сокращении времени анализа с $41,6 \pm 6,7$ до $10,4 \pm 1,8$ мин ($p < 0,001$).

Уточнена диагностическая роль цифрового анализа КЛКТ в ортодонтическом планировании. Показано, что обязательной частью обследования является оценка положения головок нижней челюсти в ВНЧС и толщины кортикальной кости альвеолярного отростка верхней челюсти и альвеолярной части нижней челюсти. Средняя абсолютная ошибка измерений составила $0,21 \pm 0,08$ мм, ICC — 0,93–0,99, время анализа сократилось с $36,9 \pm 6,1$ до $17,8 \pm 2,9$ мин ($p < 0,001$).

Разработан способ ортодонтического лечения дистальной окклюзии с применением индивидуальных позиционирующих окклюзионных накладок, изготовленных с использованием цифровых технологий, при котором перемещение зубов проводится в заранее определённом терапевтическом положении нижней челюсти. Новизна способа подтверждена патентом РФ № 2825047 «Способ устранения дистальной окклюзии зубных рядов». Также разработан конструкционный материал для аддитивного производства разобщающих прикусных накладок, что подтверждено патентом РФ № 2853878 «Светоотверждаемая композиция для 3D-печати разобщающих прикусных накладок».

Впервые проведена клиническая оценка предложенного способа лечения дистальной окклюзии по совокупности функциональных и морфологических показателей. После лечения частота жалоб на дискомфорт в области ВНЧС снизилась с 80,0% до 13,3%, боль по ВАШ — с $4,8 \pm 1,6$ до $0,9 \pm 0,7$ балла, коэффициент асимметрии ЭМГ — с $24,7 \pm 6,8\%$ до $8,9 \pm 3,4\%$, сагиттальная щель — с $7,4 \pm 1,5$ до $2,1 \pm 0,6$ мм, глубина резцового перекрытия — с $5,8 \pm 1,4$ до $2,4 \pm 0,7$ мм ($p < 0,001$).

Разработан цифровой модуль моделирования позиционирующих окклюзионных накладок в терапевтическом положении нижней челюсти. Среднее RMS-отклонение составило $0,12 \pm 0,04$ мм, совпадение окклюзионных контактов — 93,8%, ICC — 0,91–0,99, а время моделирования сократилось с $58,4 \pm 9,1$ до $14,8 \pm 2,3$ мин ($p < 0,001$).

Впервые разработана интегрированная компьютерная программа «СМАРТ-ОРТО», объединяющая модули фотометрического, биометрического, цефалометрического и КЛКТ-анализа, а также модуль цифрового моделирования позиционирующих окклюзионных накладок с автоматическим формированием ортодонтической карты пациента и презентации плана лечения. Разработка подтверждена свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024681396.

Установлена высокая эффективность интегрированной цифровой системы «СМАРТ-ОРТО»: ошибка интеграции данных составила 0,03–0,06 мм, ICC — 0,92–0,99, время полного цифрового протокола сократилось с $189,4 \pm 24,7$ до $61,8 \pm 8,9$ мин, время формирования медицинской карты — с $34,6 \pm 6,8$ до $4,2 \pm 1,1$ мин, а презентации плана лечения — с $28,4 \pm 6,2$ до $3,8 \pm 1,0$ мин ($p < 0,001$).

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии научных представлений о возможностях комплексной цифровой диагностики в ортодонтии и формировании единого подхода к цифровому планированию

ортодонтического лечения. В работе систематизированы современные методы цифрового фотометрического, биометрического, цефалометрического и КЛКТ-анализа, определены их диагностические возможности, ограничения и клиническая значимость при обследовании пациентов с зубочелюстными аномалиями.

Впервые научно обоснована концепция интеграции различных цифровых диагностических модулей в единую цифровую систему планирования ортодонтического лечения с автоматическим объединением диагностических данных, формированием медицинской документации и визуализацией плана лечения пациента. Полученные результаты расширяют существующие представления о цифровой трансформации ортодонтической диагностики и создают теоретическую основу для дальнейшего развития интеллектуальных цифровых технологий в стоматологии.

Существенное теоретическое значение имеют данные о взаимосвязи морфологических и функциональных показателей при лечении пациентов с дистальной окклюзией. В ходе исследования было установлено, что при цифровом планировании ортодонтического лечения необходимо учитывать положение головок нижней челюсти в височно-нижнечелюстных суставах, состояние кортикальной пластинки челюстей и показатели электромиографии жевательных мышц. Учет этих данных позволяет более точно планировать перемещение зубов, уменьшить вероятность осложнений и повысить стабильность результатов лечения в отдалённые сроки.

Практическая значимость работы связана с разработкой и внедрением цифровых методов диагностики и планирования, которые повышают точность обследования, улучшают повторяемость результатов и сокращают время, необходимое для диагностики и подготовки к ортодонтическому лечению.

Разработанный метод цифрового фотометрического анализа позволяет объективно оценивать эстетические параметры лица и проводить исследование быстрее по сравнению с традиционной антропометрией.

Предложенный способ цифрового анализа внутриротовых оптических оттисков дает возможность подробно изучать параметры зубных рядов без изготовления гипсовых моделей, что упрощает диагностику и делает её более удобной.

Метод цифровой цефалометрической обработки телерентгенограмм уменьшает влияние субъективной оценки и позволяет получать более стабильные результаты анализа.

Отдельное практическое значение имели результаты анализа КЛКТ, которые подтвердили необходимость оценки состояния височно-нижнечелюстных суставов и толщины кортикальной кости челюстей на этапе ортодонтического планирования. Эти данные позволяют определять допустимые границы перемещения зубов и снижать риск осложнений во время лечения.

В рамках исследования был разработан способ лечения дистальной окклюзии с применением индивидуальных позиционирующих окклюзионных накладок, изготовленных с использованием цифровых технологий, а также специальный материал для их аддитивного производства.

Разработанные решения защищены патентами РФ № 2825047 и № 2853878 и могут быть использованы в клинической ортодонтической практике.

Практическую ценность представляет разработанный цифровой модуль моделирования позиционирующих окклюзионных накладок, обеспечивающий высокую точность воспроизведения терапевтического положения нижней челюсти и сокращение времени цифрового моделирования ортодонтических конструкций.

Ключевым практическим результатом исследования стало создание интегрированной цифровой системы «СМАРТ-ОРТО», объединяющей модули комплексной диагностики, цифрового планирования лечения, автоматического формирования ортодонтической карты пациента и презентации плана лечения. Использование программы позволяет

существенно сократить время выполнения полного диагностического протокола, стандартизировать процесс ведения пациента, снизить вероятность ошибок ручного переноса данных и повысить качество взаимодействия врача и пациента. Разработка зарегистрирована как программа для ЭВМ (свидетельство № 2024681396).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Комплексное применение цифровых методов фотометрического, биометрического, цефалометрического и КЛКТ-анализа позволяет повысить точность, воспроизводимость и временную эффективность диагностики зубочелюстных аномалий по сравнению с традиционными аналоговыми методами исследования.

2. Разработанный способ лечения дистальной окклюзии с использованием позиционирующих окклюзионных накладок, изготовленных с применением цифровых технологий, обеспечивает достижение стабильного функционального и морфологического результата, снижение клинических проявлений дисфункции височно-нижнечелюстного сустава и повышение эффективности ортодонтического лечения.

3. Разработанный метод цифрового моделирования позиционирующих окклюзионных накладок обеспечивает высокую точность воспроизведения терапевтического положения нижней челюсти, воспроизводимость результатов и возможность их аддитивного производства с использованием специализированного конструкционного материала.

4. Интегрированная цифровая система «СМАРТ-ОРТО», объединяющая модули комплексной диагностики, цифрового планирования лечения, автоматического формирования медицинской документации и презентации плана лечения, позволяет стандартизировать ортодонтический диагностический протокол, сократить временные затраты и повысить эффективность взаимодействия врача и пациента.

Методология и достоверность исследования

Методологической основой диссертационного исследования явился комплексный междисциплинарный подход, основанный на сочетании клинических, морфометрических, рентгенологических, функциональных, цифровых и статистических методов исследования. Работа выполнена в соответствии с принципами доказательной медицины и была направлена на разработку, научное обоснование и клиническую оценку цифровых технологий диагностики и планирования ортодонтического лечения.

Исследование проводилось последовательно в несколько этапов. На первом этапе выполнен систематизированный анализ отечественных и зарубежных научных источников, посвящённых современным методам диагностики зубочелюстных аномалий и цифровым технологиям в ортодонтии. На последующих этапах осуществлялись разработка цифровых диагностических модулей, создание способа лечения дистальной окклюзии с применением позиционирующих окклюзионных накладок, разработка конструкционного материала для их аддитивного производства, цифрового модуля моделирования накладок и интегрированной цифровой системы планирования ортодонтического лечения.

Клиническая часть исследования была основана на результатах обследования и лечения 186 пациентов с различными зубочелюстными аномалиями в возрасте от 18 до 45 лет, среди которых основную группу составили пациенты с дистальной окклюзией. В ходе работы было выполнено более 11 000 линейных, угловых, биометрических, цефалометрических и томографических измерений, проанализировано свыше 750 цифровых фотографий, 370 внутриротовых оптических слепков, 320 телерентгенограмм, 280 исследований КЛКТ и более 180 электромиографических исследований жевательных мышц. Для оценки воспроизводимости результатов каждое

измерение проводилось многократно с последующим расчётом средних значений и статистической обработкой данных.

Всем пациентам проводили комплексное обследование, включавшее клинический осмотр, фотометрический анализ, внутриротовое сканирование, телерентгенографию головы, конусно-лучевую компьютерную томографию, исследование височно-нижнечелюстных суставов и электромиографию жевательных мышц. При необходимости выполнялось определение терапевтического положения нижней челюсти с последующим цифровым моделированием позиционирующих окклюзионных накладок и ортодонтическим лечением с применением элайнеров.

Разработка цифровых методов диагностики основывалась на сравнительном анализе результатов, полученных традиционными аналоговыми и цифровыми способами исследования. Для оценки диагностической эффективности проводили анализ точности измерений, воспроизводимости результатов, временных затрат и степени совпадения диагностических заключений. В качестве критериев оценки использовали абсолютную ошибку измерений, коэффициент внутриклассовой корреляции (ICC), коэффициент вариации, показатели чувствительности и воспроизводимости метода.

Оценка эффективности предложенного способа лечения дистальной окклюзии проводилась на основании клинических, функциональных и морфологических показателей. Анализировали выраженность симптомов дисфункции височно-нижнечелюстного сустава, показатели визуально-аналоговой шкалы боли, параметры электромиографии, суставные взаимоотношения по данным КЛКТ, величину сагиттальной щели, глубину резцового перекрытия и стабильность положения нижней челюсти в процессе лечения и ретенции.

Достоверность результатов исследования обеспечена достаточным объёмом клинического материала, использованием современных объективных

методов диагностики, стандартизацией условий проведения исследований, применением сопоставимых критериев оценки и многоэтапной проверкой воспроизводимости результатов. Все цифровые и аналоговые измерения выполнялись многократно с последующим расчётом средних значений и оценкой статистической стабильности данных.

Статистическая обработка результатов исследования проводилась с использованием методов вариационной статистики и современного программного обеспечения. Проверку распределения данных выполняли с использованием критерия Шапиро–Уилка. Для оценки различий между независимыми выборками применяли t-критерий Стьюдента и критерий Манна–Уитни, для связанных выборок — парный t-критерий Стьюдента и критерий Уилкоксона. Анализ воспроизводимости результатов осуществляли с расчётом коэффициента внутриклассовой корреляции ICC и коэффициента вариации. Статистически значимыми считали различия при уровне $p < 0,05$.

Высокая степень достоверности результатов подтверждается статистически значимыми различиями между цифровыми и традиционными методами по показателям временной эффективности, высокой воспроизводимостью разработанных цифровых методов (ICC 0,91–0,99), минимальными значениями абсолютной ошибки измерений и стабильностью полученных результатов при повторных исследованиях.

Научная обоснованность и практическая значимость разработанных решений подтверждены патентами РФ № 2825047 и № 2853878, а также свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024681396.

Внедрение результатов исследования

Результаты диссертационного исследования внедрены в образовательный процесс Медицинского института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования

«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» и используются при подготовке студентов, ординаторов и врачей-стоматологов по разделам ортодонтии, цифровой стоматологии и современных методов диагностики зубочелюстных аномалий.

Разработанные цифровые методы диагностики, способы цифрового планирования ортодонтического лечения, алгоритмы моделирования позиционирующих окклюзионных накладок и интегрированная цифровая система «СМАРТ-ОРТО» внедрены в лечебно-диагностический процесс клинико-диагностических центров и стоматологических клиник Медицинского института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Центра цифровой стоматологии «МАРТИ» и стоматологической клиники «ОМ-Доктор», где применяются при обследовании пациентов, планировании ортодонтического лечения и изготовлении индивидуальных ортодонтических конструкций с использованием цифровых технологий.

Личное участие автора

Автором лично определены цель и задачи исследования, проведён анализ отечественной и зарубежной научной литературы по теме диссертации, разработана общая концепция исследования и сформированы основные направления цифровой трансформации ортодонтической диагностики и планирования лечения.

Автор непосредственно участвовал в обследовании и лечении 186 пациентов с зубочелюстными аномалиями, выполнял клиническое обследование, фотопротоколирование, внутриротовое сканирование, анализ телерентгенограмм, конусно-лучевой компьютерной томографии, электромиографических исследований и определение терапевтического положения нижней челюсти. Лично проведено более 11 000 линейных,

угловых, биометрических, цефалометрических и томографических измерений, проанализировано свыше 750 цифровых фотографий, 370 внутриротовых оптических слепков, 320 телерентгенограмм, 280 исследований КЛКТ и более 180 электромиографических исследований жевательных мышц.

Автор принимал непосредственное участие в разработке цифровых методов фотометрического, биометрического, цефалометрического и КЛКТ-анализа, создании способа лечения дистальной окклюзии с применением позиционирующих окклюзионных накладок, разработке конструкционного материала для их аддитивного производства, цифрового модуля моделирования накладок и интегрированной цифровой системы «СМАРТ-ОРТО».

Автором лично выполнены клиническая апробация разработанных методов, сбор первичных данных, формирование базы исследования, статистическая обработка и анализ полученных результатов. Автор непосредственно участвовал в подготовке заявок на получение патентов РФ № 2825047 и № 2853878, а также свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024681396.

Автор самостоятельно сформулировал основные положения, выводы и практические рекомендации диссертационного исследования, подготовил научные публикации и материалы для внедрения результатов работы в образовательную и клиническую практику.

Список публикаций по теме диссертации

По материалам исследования опубликовано 16 печатных работ, из них 1 монография, 3 работы – в журнале, индексируемом в международной базе данных Scopus и ВАК; 6 работ – в журнале, рекомендованном Перечнем РУДН/ВАК, а также получено 7 патентов на изобретения.

Монографии:

1. Апресян С.В., Степанов А.Г., Забаева М.Н., Московец О.О. Цифровая стоматология. Экономика и менеджмент / (монография) – М.: Практическая медицина, 2024. 148 с. ISBN 978-5-98811-812-1. УДК 616.31:004; ББК 56.6.

Публикации в изданиях, включенных в международные базы цитирования WoS и Scopus

2. Апресян С.В., Степанов А.Г., Московец О.О., Малиева Э.А. Цифровое планирование ортодонтического лечения: литературный обзор // Российский стоматологический журнал. - 2024. - Т. 28. - №6. - С. 601-611. doi: 10.17816/dent634964

3. Московец О.О., Слабковская А.Б., Московец О.Н. Гидратация внеклеточной среды тканей пародонта в динамике ортодонтического лечения у пациентов с дистальной окклюзией // Клиническая стоматология. – 2021. – Т. 24, № 3. – С. 98-103. – DOI 10.37988/1811-153X_2021_3_98. – EDN TRVYVG.

4. Ступницкий А.В., Картон Е.А., Панкратова Н.В., Постников М.А., Московец О.О. Состояние гемодинамики пародонта боковых зубов у ортодонтических пациентов при смене нитиноловых дуг различного сечения / А. В. Ступницкий, Е. А. Картон, Н. В. Панкратова [и др.] // Ортодонтия. – 2018. – № 4(84). – С. 52-61. – EDN FQYUJY.

Публикации в изданиях, рекомендованных Перечнями РУДН/ВАК

5. Начарьян Д.Г., Апресян С.В., Степанов А.Г., Московец О.О., Бутков Д.С. Цифровые протоколы комплексной ортопедической реабилитации пациентов с синдромом болевой дисфункции височно-нижнечелюстного сустава (обзор литературы). Проблемы стоматологии. 2025; 2: 37-42. DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-2-37-42.

6. Ступницкий А.В., Панкратова Н.В., Картон Е.А., Персин Л.С., Постников М.А., Московец О.О. Состояние гемодинамики пародонта на этапах ортодонтического лечения у пациентов с разной толщиной

альвеолярного отростка в области верхних боковых зубов (Часть II) // Институт стоматологии. – 2019. – № 2(83). – С. 59-61. – EDN WBYIAP.

7. Ступницкий А.В., Панкратова Н.В., Картон Е.А., Персин Л.С., Постников М.А., Московец О.О. Состояние гемодинамики пародонта на этапах ортодонтического лечения у пациентов с разной толщиной альвеолярного отростка в области верхних боковых зубов (Часть I) // Институт стоматологии. – 2019. – № 1(82). – С. 56-59. – EDN KYFLHF.

8. Клиническая эффективность применения индивидуального программируемого прикусного блока для профилактики обострения симптомов мышечно-суставной дисфункции / Д. Г. Начарьян, С. В. Апресян, А. Г. Степанов, М. В. Копылов, О. О. Московец // Проблемы стоматологии. – 2026. – Т. 22, № 2. – С. 274–282

9. Клиническая эффективность дифференцированных протоколов комплексной ортопедической реабилитации пациентов с дисфункцией височно-нижнечелюстного сустава / Д. Г. Начарьян, С. В. Апресян, А. Г. Степанов, М. В. Копылов, О. О. Московец // Проблемы стоматологии. – 2026. – Т.22, № 2. – С. 264–273.

Патенты:

10. Оклюзионная зубная шина: Пат. 227232 РФ. МПК А61С 7/00 / М.К. Макеева, Корзун А.Л., С.В. Апресян, А.Г. Степанов, О.О. Московец, А.А. Геворкян; заявл.28.05.2024; опуб. 11.07.2024, Бюл. №5 –7с.

11. Способ устранения дистальной окклюзии зубных рядов Пат. 2825047 РФ. МПК А61С 7/00 / С.В. Апресян, А.Г. Степанов, О.О. Московец, К.С. Апресян; заявл.20.02.2024; опуб. 19.08.2024, Бюл. №23 –12с.

12. Программа для планирования ортодонтического лечения СМАРТ-ОРТО. Апресян С.В., Степанов А.Г., Московец О.О., Малиева Э.А. Заявка № 2024669938. Свидетельство № 2024681396 от 28.08.2024.

13. Способ выполнения терапевтической санации полости рта в период лечения мышечно-суставной дисфункции: Пат. 2830400 РФ. МПК

A61C 7/00 / Макеева М.К., Корзун А.Л., С.В. Апресян, А.Г. Степанов, О.О. Московец, А.А. Геворкян; заявл.28.05.2024; опуб. 18.11.2024, Бюл. №32 –8 с.

14. Способ профилактики патологии височно-нижнечелюстного сустава во время стоматологического лечения. Пат. 2843790 РФ. МПК A61C 8/00. Апресян С.В., Степанов А.Г., Начарян Д.Г., Московец О.О., Копылов М.В. Заявл. № 2025102907 от 11.02.2025; опуб. 18.07.2025, Бюл. №20 – 10 с.

15. Прикусной блок для фиксации челюстей. Пат. 2844632 РФ. МПК A61C 8/00. Апресян С.В., Степанов А.Г., Начарян Д.Г., Копылов М.В. Московец О.О. Заявл. № 2025102909 от 11.02.2025; опуб. 04.08.2025, Бюл. №2 – 7 с.

16. Светоотверждаемая композиция для 3Д-печати разобщающих прикусных накладок. Пат. 2853878 РФ. МПК A61C 8/00. Будников С.Ю., Белов К.К., Корнилов К.В., Иту И.И., Апресян С.В., Степанов А.Г., Московец О.О., Малиева Э.А., Заявл. № 2024126459 от 09.09.2024; опуб. 26.12.2025, Бюл. №36–5 с.

Апробация работы

Основные положения диссертационного исследования доложены, обсуждены и получили положительную оценку на российских и международных научных форумах, конгрессах и конференциях, посвящённых современным технологиям диагностики, цифровой стоматологии и ортодонтическому лечению.

Результаты исследования представлены на Международном конгрессе «Стоматология Большого Урала – 2021» и X Форуме стоматологов Уральского федерального округа (Екатеринбург, 23–25 ноября 2021 г.); врачебной конференции «Инновационные технологии комплексной реабилитации стоматологических пациентов. Altracore Biomedical East» (Сочи, 08–12 апреля 2022 г.); конференции «Цифровые решения в современной стоматологии» (Самарканд, Узбекистан, 16 июня 2023 г.); XLIX Всероссийской научно-практической конференции СТАР «Стоматология XXI века» (Москва, 26 сентября

2023 г.); 3-й специализированной выставке «Стоматология Республики Башкортостан» (Уфа, 02 ноября 2023 г.).

Основные результаты работы, посвящённые цифровому планированию ортодонтического лечения и интеграции цифровых диагностических технологий, также были представлены на конференции «Цифровые технологии в современной стоматологии», проходившей в рамках 51-й Всероссийской научно-практической конференции СтАР «Актуальные проблемы стоматологии» (Москва, 2024 г.), а также на конференции «Цифровые технологии в современной стоматологии», состоявшейся 22 апреля 2025 года в Москве в рамках 52-й Всероссийской научно-практической конференции СтАР «Актуальные проблемы стоматологии».

Материалы диссертации неоднократно обсуждались на профильных научно-практических конференциях по ортодонтии, цифровой стоматологии и функциональной диагностике, отражённых в публикациях автора по теме диссертационного исследования.

Диссертационная работа апробирована на совместном заседании кафедры ортопедической стоматологии и Института цифровой стоматологии Медицинского института ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», одобрена и рекомендована к защите, протокол №0300-65-БУП-15 от 10.06.2026 г.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, главы «Материалы и методы исследования», двух глав собственных исследований, заключения, выводов, практических рекомендаций, списка сокращений, списка литературы и приложений.

Работа изложена на 386 страницах машинописного текста, иллюстрирована 67 таблицами и 28 рисунками и фотографиями. Список литературы включает 606 источников, из них 349 отечественных и 257 зарубежных авторов.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Аномалии и деформации зубочелюстно-лицевой системы (далее – ЗЧЛС) – одна из наиболее распространенных нозологических форм в структуре стоматологических заболеваний современности. Их популяция, по различным данным, варьируется в пределах – от 11,4 до 71,7% [Цветкова, 2023]. Медицинская статистика ежегодно фиксирует системный прирост их доли [Анохина, Качалова, 2019; Арзуманян, Фомина, 2019; Персин, 2020]. Так, согласно усредненным эпидемиологическим данным за последнее десятилетие (2014-2024), распространенность аномалий/деформаций ЗЧЛС среди детей и подростков в мире достигает 68% [Laganet et al., 2017; Roslan et al., 2018; Baliya et al., 2022], среди взрослых – 45% [Куроедова, Макарова, 2012; Renugalakshmi et al., 2023] занимая третье место после кариеса и заболеваний пародонта [Багненко и др., 2016; Сулейманова и др., 2017; Кучкарова, Абдусаматова, 2022; Беляев и др., 2023].

К наиболее часто встречающимся патологиям относят сагиттальные (прогнатия, прогения и проч.) (40%) и трансверсальные (общесуженные зубные ряды, несоответствие верхнего и нижнего зубных рядов и проч.) (60%) [Чантырь и др., 2016; Хвостенко, 2023]. Лидирующие позиции в спектре зубочелюстных аномалий занимает сужение верхнего зубного ряда (63,2%) (как правило в области премоляров), сопровождающееся аномалиями положения зубов, зубных рядов и прикуса [Полякова, 2017]. Помимо морфологических и гистологических изменений, при данных зубочелюстных аномалиях наблюдается нарушение функций жевательных и мимических мышц, изменение ВЧНС, пародонта зубов, неправильное дыхание, глотание, нарушение речи и проч. [Drenski Baliya et al., 2022; AlHudaithi et al., 2023]. Кроме того они, как правило, сопровождается эстетическими нарушениями лица, не только затрудняющими нормальную социализацию пациента, но и

причиняя ему моральные страдания, так же как и любой другой физический недостаток/дефект [Налбандян и др., 2018].

Одной из приоритетных задач современного ортодонтического лечения является достижение совокупного морфологического, функционального и эстетического оптимума строения и функционирования ЗЧЛС [Lepilin et al., 2019; Okićić et al., 2023]. Идея и содержание данной концепции, предложенной еще в конце 20-х гг. XX в. В. Андерсеном, системно переосмысливается, что обусловлено постоянным развитием научного диагностического и клинического знания. Среди прочего, насущной проблемой международного стоматологического сообщества является поиск компромисса в представлении о *норме*, согласно Андерсену, – наивысшей величиной данного оптимума. В настоящее время в основу данного понятия закладывается представление об *«оптимальной индивидуальной норме»*, т.е. о состоянии достаточно гарантированного во времени, морфологического, функционального и эстетического равновесия в ЗЧЛС и лицевом скелете в целом, достижение которого в итоге и является целью фактически любой ортодонтической процедуры [Малыгин, 1976].

Вместе с тем определение границы между нормой и патологией – сложная задача и ее решение повышает трудоемкость как процесса диагностики, так и планирования ортодонтического лечения. Последнее обусловлено тем фактом, что фактически любая зубочелюстная аномалия (деформация) рассматривается врачом-ортодонтом как «болезнь», требующей комплексного лечения, тогда как приоритетом для пациента становится достижение некоторого *усредненного эталона* [Трезубов и др., 2002], согласуемого с актуальным этнокультурным и, вместе с тем, общесоциальным запросом [Jefferson, 1993]. Таким образом, *нивелирование эстетических отклонений*, к которым приводят морфологические и функциональные нарушения при наличии зубочелюстных аномалий (деформаций), становится основным

запросом пациента к врачу-ортодонту [Коваленко, 2011; Налбандян и др., 2018; Токаревич и др., 2023].

Указанные тренды актуализируют запрос международному стоматологическому сообществу и иным стейкхолдерам (включая производителей диагностического оборудования и разработчиков ПО для CAD/CAM систем и технологий) к совершенствованию существующих и разработке новых подходов к ортодонтическому лечению для целей удовлетворения возрастающего спроса на качественные продукты (ортодонтические конструкции) и услуги отрасли среди различных слоев и социально-демографических групп населения [Бороздина, Кучерявенко, 2021]. Данный тезис приобретает особую значимость в отношении взрослых пациентов. Лечение взрослых пациентов в настоящее время занимает все большую часть в практике ортодонта [Попова, Арсенина, Глухова, 2021].

Как правило, запрос на ортодонтическое лечение формируется в связи с аномалиями положения зубов (вестибулярного, орального, мезиального, супраположения, инфраположения, тортоаномалий, транспозиций), нарушением дистальной окклюзии, скученным расположением зубов, больших межзубных промежутков (ортодонтическое лечение показано при диастеме – увеличении щели между резцами, и при тремах – больших промежутках между другими зубами), в том числе обусловленное естественным перемещением зубов к альвеолярному отростку, нетипичное расположение челюсти относительно друг друга. Ортодонтическое лечение также часто требуется как подготовка к протезированию малоинвазивными конструкциями, дентальной имплантации [Марков, 2009; Гордиенко, 2019; Арсенина и др., 2023]. Отмечается, что ранее нелеченные («запущенные») зубочелюстные аномалии, могут стать причиной отказа от рационального протезирования [Арсенина, Абакаров и др., 2023]. Предполагается выравнивание зубного ряда, скученных участков, устранение веерообразного расхождения и схождения зубов, исправление положения отдельно стоящих

зубов, придание параллельности опорных зубов и иных деформаций зубных рядов [Величко, Белодед, 2009; Гордиенко, 2019; Alfallaj et al., 2020; Mundhada et al., 2023; Alsulaimani et al., 2023]. Указанные и иные меры необходимы для снижения риска развития функционального перегрузки пародонта, нарушений функционирования ВНЧС и жевательных мышц.

Однако, в связи с прохождением всех стадии роста и наличием уже сформированного зубочелюстного комплекса, алгоритм планирования их ортодонтического лечения более инвариантен и многоэтапен, чем в случаях планирования аналогичного лечения детей и подростков [Попова, Арсенина, Глухова, 2021; Попова, 2022; Глухова, 2022]. Кроме того, ортодонтическое лечение взрослых пациентов, как правило, усложнено ассоциированными зубочелюстными аномалиями стоматологическими заболеваниями (например, заболеваний пародонта [Аверьянов, Зубарева, 2015; Куватбаева, 2017; Сергеева, 2022]), наличие которых считается относительным противопоказанием к ортодонтическому лечению. К таковым традиционно (стандартно) относят плохую гигиену полости рта, нарушение височно-нижнечелюстного сустава, бруксизм и проч., также аллергию на определенный материал [Ворожко, 2020]. При некоторых заболеваниях, ортодонтическое лечение может оказаться невозможным (например, опухоли ротовой полости [Тараткина, 2022; Панферова, 2022]). К иным абсолютным противопоказаниям к ортодонтическому лечению также относятся характерные для взрослого возраста системные заболевания (сердечно-сосудистые, иммунодефицитные состояния, онкология, расстройства гормональной системы и проч.), психические расстройства (шизофрения, паранойя, слабоумие, психозы, неврозы, алкоголизм и наркомания), заболевания костной (остеопороз, остеонекроз, дисплазии и проч.) и эндокринной систем (заболевания гипофиза и надпочечников, тяжелые формы гипер- и гипотиреоза, гипер- и гипопаратиреоза, сахарный диабет), патологии

иммунной системы и проч. [Ортодонтия. Национальное руководство, 2020; Персин и др., 2021; Хорошилкина, 2022].

У взрослых пациентов, обращающиеся за ортодонтическим лечением, как правило *отсутствуют отдельные зубы* (вторичная адентия встречается в более чем 90% случаев [Хоранова, Фомина, 2017; Гордиенко, 2019]). Отмечается, что например, у пациентов с частичной адонтией и дистальной окклюзией наблюдаются: истираемость режущих краев фронтальных зубов и жевательных бугров боковых зубов, зубоальвеолярное удлинение зубов-антагонистов и мезиальный наклон постоянных моляров в области отсутствующих (удаленных) зубов, проявление трем и диастем, а также признаков дисфункции ВЧНС, иных проблем, в том числе обусловленных невозможностью обеспечения удовлетворительной гигиены полости рта [Wada et al., 2015; Арсенина, Козаченко, 2018; Фадеев и др., 2018; Попова, Арсенина, Махортова, 2020]. Ограничивающим фактором, а в ряде случаев и относительным противопоказанием для проведения комплексного ортодонтического лечения, может оказаться наличие терапевтических реставраций и (или) ортопедических конструкций [Наумович, 2020].

Развитие научного и эмпирического знания позволяет искать новые способы нивелирования традиционных барьеров к ортодонтическому лечению, что обусловлено активной интеграцией компьютерных и дигитальных технологий в современную стоматологическую практику. Так, например, в условиях частичной или даже полной адентии оптический слепок (цифровой оттиск), созданный с использованием интраорального сканера, как правило, оказывается единственным вариантом создания цифровой модели стоматологического пациента [Patzelt et al., 2013; Hack et al., 2020; Saravi et al., 2023]. Кроме того, с появлением цифровых и 3D-технологий повышается доступность и срочность многих видов и методов диагностики, тогда как вновь создаваемые программ комплексного планирования ортодонтического лечения дают возможность системного перманентного снижения объемов

ресурсных затрат и, как следствие, оптимизации клинико-экономической эффективности лечения на каждом этапе (предиктивная диагностика, визуализация результата, производство – фрезерование/3D-печать, – ортодонтической конструкции, фиксация, плановое наблюдение, ретенционный период) [Силин и др., 2019; Чхиквадзе и др., 2020; Габдрафиков, 2021; Гиоева и др., 2021; Басиева, 2022; Арзуманян и др., 2022; Рыжова и др., 2023; Panayi et al., 2023]. Одновременно с этим, доступные в настоящее время отечественные и зарубежные литературные источники не содержат достаточно структурированную информацию, которая бы описывала методологию применения цифровых методов и технологий в практике ортодонтического лечения [Апресян, Степанов, Забаева, Московец, 2024; Апресян, Степанов, Московец, Малиева, 2024].

1.1. Диагностика в ортодонтии, аналоговые и цифровые методы

1.1.1. Эстетика лица: понятие и методы исследования

Понятие «эстетика» в системе стоматологического (ортопедического) знания в настоящее время не имеет единого определения. Как правило, оно интерпретируется с позиции категории «эстетика улыбки», описываемая в литературе, как оптимальное сочетание нескольких критериев красивой улыбки и пропорциональности лица [Лебеденко, Апресян, 2018; Зубков, 2018; Воробьев и др., 2020; Jafri et al., 2020; Есенин и др., 2020; Воробьев и др., 2021; Cheng et al., 2021; Kau et al., 2022; Умирзакова и др., 2022]. Согласно им, эстетика улыбки – это гармоничное сочетание и лица (анатомия верхней и нижней губы, выраженность подбородочной и носогубной складок и пр.), и зубов, и мягких тканей полости рта (десна, уздечки, щечные тяжи) [Воробьев, Македонова и др., 2020]. Закон гармонии также действует и в отношении эстетики лица; применительно в ортодонтии он может быть сформулирован как: *единство формы* – соразмерность, пропорциональность отдельных элементов лица и ЗЧЛС в покое, – и *функции* – правильные гармоничные

движения нижней челюсти, сокращение жевательных и мимических мышц, правильное соотношение отдельных элементов лица и органов ЗЧЛС во время разговора, пережевывания пищи, глотания, – а также *целостность построения ЗЧЛС, соразмерность и пропорциональность отдельных ее элементов* [Тихонов и др., 2016].

В зарубежной научной литературе категории эстетики лица и эстетики улыбки описываются в терминах «золотого сечения» [Cervino et al., 2019; Cheng et al., 2021; Goyal et al., 2023]. В настоящее время эстетически правильным (гармоничным) является лицо, соответствующее GR-параметрам, предложенным челюстно-лицевым хирургом С. Марквардтом [Rodriguez et al., 2014]. Однако, отмечается, лишь у незначительной части пациентов зубочелюстные аномалии сопровождаются гармоничным лицевым профилем [Польма, 2009]. Диагностически более точные результаты дают Дентально-эстетический индекс (DAI), Индекс необходимости ортодонтического лечения (IOTN-AC), Индекс DESI [Lobb et al., 1994; Chandra et al., 2023; Маланова и др., 2023] и др. Однако, и их применение может быть ограничено неточностью интерпретации данных, неполным отражением компонентов эстетики лица и улыбки [Спицына, 2018]. Поэтому исследователями предлагаются авторские Индексы эстетики лица (И. В. Гуренкова [2007], А. В. Коваленко [2011], Н.С. Конс и соавт. [1989], Ш. Сундаресваран и Р. Рамакришнан [2016] и проч.). Данные инструменты применяются в том числе для целей антропометрических исследований. Они направлены на измерение морфологических и функциональных признаков и включает в себя исследование эстетики лица (формы, размеров, угловых и линейных параметров лица, их соотношение) и изучение диагностических моделей зубных рядов (биометрия).

С помощью фотометрии определяют симметрию и гармоничность лица, профиль лица, арку улыбки, выявляют смещение подбородка, оценивают совпадение межрезцовых линий и центра лица, форму зубных рядов,

соотношения зубных рядов, оценку зубоальвеолярных дуг и отдельно стоящих зубов, и проч. [Хворостенко, 2023]. Получаемые результаты также могут быть использованы для создания 3D моделей зубов и челюстей [Польма и др., 2007; Польма, Черемисова, 2009; Rao et al., 2019; Faccioni et al., 2021; Liu et al., 2023]. Фотометрия может проводиться с помощью специальных компьютерных программ (например, «Фотоплан») [Персин и др., 2021], или дигитального инструментария, включенного в современные программы комплексного планирования стоматологического лечения, в т.ч. имеющих возможность оценки симметрии, выравнивание изображения (например, Aventis 3D, 3Shape и проч. [Апресян, Степанов, Антоник, 2020]). Получение достоверных результатов анализа фотографий обеспечивает соблюдение требований *четкой ориентации головы* пациента в сагиттальной, фронтальной и трансверсальной плоскостях [Ортодонтия. Национальное руководство, 2020]. Облегчить выполнение процедуры позиционирования головы позволяет *фотостат* [Ниметуллаев, 2012; Кузьменко и др., 2020].

Кефалометрическое исследование позволяет выявлять закономерности строения лицевого и мозгового черепа, пропорционального соотношения различных отделов головы и отношения их к определенным плоскостям, в целях дифференциации нормы от патологии [Вахней, 2019]. Для определения формы лица применяются индексы Дж. Карсона и фациальный морфологический индекс Г. Изарда [Персин, 2016]. Для изучения челюстного типа лица может быть использован способ С. В. Дмитриенко, Д.А. Доменюка и Э.Г. Ведешинной [Селескерики и др., 2020; Давыдов и др., 2022]. Для проведения кефалометрических исследований рекомендуется использовать цифровые методы/технологии [Мотоусова и др., 2020] для снижения вероятности погрешностей и неточностей, однако, с учетом рекомендаций В. С. Сперанского [Доменюк и др., 2018]. Так, С. А. Мотоусовой и колл. описан способ измерения кефалометрических параметров с применением интерактивного мобильного приложения 3D Beauty [2020].

Цефалометрия – один из наиболее ценных диагностических методических инструментов, предназначенный для количественного изучения пропорций и взаимоотношений различных отделов лицевого черепа в целях выявления патогенеза аномалии ЗЧЛС и ее форму [Николаев и др., 2019; Choi et al., 2020; Fayad et al., 2020; Муртазаев и др., 2022; Prakash et al., 2023]. Ее диагностической основой является *телерентгенологический снимок (ТРГ)* в боковой проекции, отражающий пространственное положение зубов верхней и нижней челюстей, состояние мягких тканей и скелетное строение челюстей. К настоящему времени предложено множество методов/технологий анализа ТРГ, в т. ч. с использованием мобильных приложений (например, OrthoLine). Однако, отмечается, что среди широкого спектра параметров, редко встречаются позиции [Балашова, 2024], предназначенные для оценки состояния дыхательных путей, при их высокой диагностической значимости [Kissel et al., 2021]. В этой связи интерес вызывает решение, предложенное Е. М. Балашовой и колл. (Патент RU2498297C1) [2024].

Цефалометрия проводится с использованием различных программных (Dolphin Imaging, OnyxCeph, Planmeca Romexis 3D Cephalometry и проч.), в т.ч. 3D решений, позволяющим перемещать и вращать объемные реконструкции черепа и челюстно-лицевой области, оценивать рентгенологические изменения и структуры ВСЧН. Отмечается, что трехмерное исследование позволяет получить больше информации о причинах и этиологии данной патологии [Qian et al., 2022]. Вспомогательным инструментом для *проведения расчетов и распознавания результатов ТРГ* являются ПО OrthoLine, Dolphin Imaging, OnyxCeph, Avantis 3D, 3Shape Ortho System и проч. [Апресян, Степанов, Антоник, 2020].

Ключевое значение в диагностике аномалий (деформаций) ЗЧЛС занимает цифровой фотопротокол, т. е. тактика лечения основывается изначально на жалобах и эстетических запросах пациента [Налбандян и др., 2018; Жмырко и др., 2020; Шувалова и др., 2023]. *Клиническая фотография*

является обязательной частью диагностики, а в последующем планирования комплексного ортодонтического лечения, поэтому она должна быть не только качественной, но и стандартизированной, в том числе для оптимального распознавания биометрических данных программой планирования улыбки и/или комплексного планирования ортодонтического лечения. В настоящее время разработано множество протоколов, отличающихся по количеству фотографий и проекций, позволяющих акцентировать внимание пациента и врача в зависимости от проводимых диагностических процедур [Персин, 2016; Попова, 2020; Глухова, 2022; Попова, 2022].

Качественные портретные, а также *дентальные фотографии* получают с использованием современных цифровых/зеркальных фотокамер и оптимально подобранными объективами, вспышкой и проч. Дентальная фотография – это позитивное отображение зубов и зубных рядов, окклюзионных взаимоотношений, слизистых полости рта. Стандартный фото-протокол включает в себя внутриротовые фотографии в следующих проекциях: фронтальная в привычной окклюзии (с контрастером); фронтальная с приоткрытым ртом для контроля девиации нижней челюсти; фотография сомкнутых зубов в боковой проекции справа и слева; фотография верхнего и нижнего зубных рядов [Жулев и др., 2018; Шишмарева, 2018]. Качественная дентальная фотография имеет высокий диагностический потенциал, особенно если в последующем она используется для целей цифровых и исследований [Успенская и др., 2019; Talaat et al., 2021; Ryu et al., 2023].

1.1.2. Биометрические методы исследования

Биометрические методы исследования гипсовых моделей челюстей являются одними из ведущих в практике ортодонтической диагностики. С их помощью определяется топография и выраженность морфологических нарушений при различных аномалиях ЗЧЛС [Доменюк и др., 2015; Доменюк и др., 2017; Dmitrienko et al., 2019; Григоренко и др., 2022; Дмитриенко и др., 2023; Longhi et al., 2024]. Для изучения получают оттиск и отливают гипсовые

модели челюстей до и после лечения. Анализ проводится в трех взаимно перпендикулярных плоскостях: саггитальной, трансверсальной и вертикальной [Арсенина, Попова, Попова и др., 2019; Коннов и др., 2019; Попова, 2020; Васильев и др., 2022]. Биометрия проводится с использованием штангенциркуля-одонтометра с заостренными ножками, и различной ценой деления нониуса. Измерение зубов рекомендуется проводить между наиболее удаленными точками проксимальных сторон и в вестибулярно-лингвальном направлении [Дмитриенко и др., 2022].

На моделях измеряют: размер зубов (индексы Тонна, Болтона, Долгополова, метод Зубковой), длину зубных рядов (методы Нанса, Мойерса, модификация Танаки и Джонсона) и переднего отрезка зубной дуги (метод Корхауса), ширину зубных рядов (метод Понта, в модификации Линдера-Харта), размеры апикального базиса (метод Хауса в модификации Снагиной), симметричность и смещение боковых зубов (О-анализ, симметроскопия, методы Фусса и Шмидта), соотношение зубных рядов (метод Герлаха), форму зубных рядов (диаграммы Шварца и Хаулея-Гербера-Гербста). Также предлагаются авторские методики проведения биометрии в общей диагностической схеме [Шкарин и др., 2022; Гаврилова, 2023]. В ряде исследований констатируется вероятность погрешностей при использовании некоторых из указанных методов [Торохова и др., 2017; Рубникович и др., 2017; Шумилина, Бородина, 2018].

Наиболее распространенным методом биометрии является одонтометрический анализ, с учетом групповой принадлежности зубов [Доменюк и др., 2016; Иванова, 2018; Shkarin et al., 2019]. С его помощью определяются аномалии размеров коронок отдельных зубов, выявляется соразмерность зубов-антимеров и зубов-антагонистов, также определяется дентальный тип зубной системы [Igbemi et al., 2019; Eboh, 2019]. Показатели регистрируются по оттискам верхней и нижней челюстей (метод А. А. Зубова) [Николаев и др., 2018; Калмин и др., 2022]. Перспективным является метод

автоматизированной цифровой одонтометрии, предложенный А. Габучян и соавт. [2020].

Одонтометрия обычно проводится ручным способом, с использованием специализированных *компьютерных программ* для оптимизации аналитики и расчетов (например, OrthoCAD, DigiModel, OthoLab и проч.) [Ярадайкина, 2014; Westerlund et al., 2015; Felter et al., 2018; Глухова, 2022], *программных решений комплексного планирования стоматологического лечения* (например, ПО 3Shape – Модуль Ortho System [Апресян, Степанов, Антоник, 2020]), и (или) с использованием аналоговых и цифровых методов – *фотографирования* (например, метод фотостатической биометрии с построением диагностических геометрических фигур [Ягупова и др., 2023]) и *сканирования* для получения 3D визуализаций контрольно-диагностических моделей. Сравнительные исследования, как правило, не показывают существенных различий в эффективности диагностических результатов при использовании разных методов одонтометрии [Ahmed et al., 2022; Kardach et al., 2023]. Однако, обнаруживаются доказательства того, что 3D сканирование гипсовых моделей представляют наиболее точный метод оценки размеров зубов и зубных рядов и занимает втрое меньше времени, чем ручная [Текучева и др., 2015] и цифровая биометрия [Катбех и др., 2019].

Альтернативой гипсовым моделям являются *внутриротовое сканирование и анализ цифровых 3D моделей зубных рядов* [Krenn et al., 2019; Апресян, Степанов, Сопоцинский и др., 2020; Жмырко, 2021; Lee et al., 2022; Хорольский и др., 2023]. Многие исследования доказывают более высокую точность моделей, созданных цифровыми методами, в сравнении с традиционными [Kasparova et al., 2013; Жулев, Вокулова, 2020; Nocar et al., 2023]. Представляет интерес способ биометрической диагностики цифровых моделей зубов и челюстей, предложенный Е. М. Балашовой и колл. (Патент RU2813296C1) [2024]. Дополнительные возможности дают ИИ- и ML-решения, позволяющие автоматизировать процессы сегментации и

выравнивания зубов по данным внутриротового сканирования в ПО виртуального сетапа [Raith et al., 2017; Kim et al., 2020; Vaid, 2021].

1.1.3. Рентгенологические методы исследования

Неотъемлемой частью комплексной стоматологической (ортодонтической) диагностики являются рентгенологические методы. Ортопантограмма (ОПТГ) – это плоскостное развернутое изображение сферических контуров челюстей, анализ которого позволяет оценить общее состояние ЗЧЛС, костной ткани, твердых тканей зубов, симметричность правой и левой сторон тела и ветви нижней челюсти, истинную высоту межальвеолярных перегородок, определить степень минерализации корней зубов, наличие адентии, сверхкомплектных и ретинированных зубов, выявить кариозные поражения, периапикальные изменения и проч. [Хафизов и др., 2015; Нанда, 2016; Ортодонтия. Национальное руководство, 2020]. К диагностическим ограничениям ОПТГ относят оценку объема компактной пластинки альвеолярной кости и состояние структур ВНЧС и жевательных мышц [Хорев, Майборода, 2017; Булычева и др., 2020; Карпова, 2022]. В этой связи интерес представляет устройство для репрезентативной ЭМГ жевательных мышц, предложенное проф. С. В. Апресяном и колл. [Apresyan et al., 2023]. ОПТГ получают с помощью аналогового или цифрового ортотомографа, работающих в 2D/3D режимах в зависимости от оператора.

Боковая и прямая телерентгенография головы (ТРГ) (профильная цефалометрия) предназначена для исследования зубочелюстных аномалий и скелетных диспропорций [Trifan, 2023]. С ее помощью можно изучить тип роста пациента, строение лицевого скелета, его роста, параметров, в т.ч. вертикальные параметры черепа, характеризующих положение и наклон зубов, определить размеры и положения челюстей в саггитальном и вертикальном направлениях, их соотношение, взаимоотношения мягких тканей и челюстных костей [Арсенина, Попова и др., 2019; Жмырко и др., 2020; Глухова и др., 2021; Арсенина, Попова, Гарилова и др., 2022]. Кроме

того, ТРГ позволяет дифференцировать гнатическую и зубоальвеолярную формы зубочелюстных аномалий, определить их локализацию [Raposo et al., 2018]. Однако, у аналоговой ТРГ имеются ограничения, создаваемые анатомическими особенностями ЧЛО, что обуславливается взаимоотношением и пространственным положением некоторых анатомических структур [Ka-lun, 2008; Черепанова и др., 2010; Kabbur et al., 2012]. Также отмечается невозможность учета толщины кортикальной кости и индивидуальных анатомических особенностей пациента [Kinzinger et al., 2009; Poorsattar-Bejeh et al., 2017; Vergara et al., 2023]. Данная проблема решается методами цифровой (3D), в т. ч. интеллектуальной (ИИ) [Оборотистов и др., 2023], цефалометрии, т. к. в отличие от традиционной ТРГ, анатомические структуры не накладываются друг на друга и не искажаются, и КЛКТ (совокупно).

При классической цефалометрии рассчитываются показатели различных параметров (с учетом принадлежности к той или иной этнической группе). Фреймворк анализа ТРГ заключается в измерении линейных размеров между определенными антропометрическими точками и их взаимоотношений, угловых параметров и выявлении пропорциональности размеров костей и их отдельных участков. Компьютерный анализ ТРГ проводится, как правило, по методу Шварца с использованием показателей нормы А. П. Колоткова и А.А. Аникиенко, О.О. Лаботкиной, В.В. Богдашевского, И. В. Потаповой [Бедрединова, 2021]. Вместе с тем, к настоящему времени известно более 130 методов анализа РТГ (по Бьерку, Де Костеру, Даунсу, Макнамара, Киму, Риккетсу, Риделю, Штайнеру, Твиду, Уайли и проч.) [Нётцель, Шульц, 2006; Шкарин и др., 2021; Аюпова и др., 2023].

Оптимизировать расчеты и повысить точность анализа позволяют различные цифровые решения. Так, 3D цефалометрия позволяет производить максимально точные индивидуальные расчеты всех плоскостей, углов и расстояний, а полученные результаты в последующем использовать

для создания ортодонтических конструкций (CAD/CAM или 3D системы). Данные дают представление о взаимоотношении пяти основных челюстно-лицевых элементов: череп и основание черепа, верхняя и нижняя челюсть, зубные ряды и мягкие ткани [Попова, Арсенина и др., 2021; Попова, Арсенина, Попова и др., 2021]. Эффективность аналитики изображений, взамен ручному способу расчета и оценки, повышают сверточные нейросети. Современные исследования доказывают эффективность автоматической CNN-идентификации широкого спектра цефалометрических ориентиров [Gilmour, Ray, 2020; Li et al., 2020; Subramanian et al., 2022]. В качестве перспективных указываются методы глубокого обучения многослойных нейросетей [Mokrenko et al., 2022; Londono et al., 2023; Surendran et al., 2024].

На сегодняшний день наиболее точные диагностические результаты дает 3D цефалометрия по конусно-лучевой томограмме [Лосев и др., 2022; Baldini et al., 2022]. С ее помощью возможно провести диагностику наличия ретинированных, дистопированных, сверхкомплектных зубов, определить толщину пластинок челюстных костей и расположения корней в альвеолярных отростках челюстей, оценить резорбцию кости, диагностировать патологию ВНЧС [Ленденгольц и др., 2010; Dindaroğlu, Yetkiner, 2016; Арсенина, Попова и др., 2019]. О. И. Арсениной и колл. был предложен метод оценки языка по данным КЛКТ [Арсенина, Гайрбекова и др., 2020]. *Методика изучения рентгенологических данных КЛКТ* включает: определение метода исследования проекции, распознавание объекта исследования и объема отображаемой зоны, анализ изображения (положение, форма, размеры, контуры, интенсивность, структура отображаемых объектов), идентификация отклонений от нормы, их анализ и сопоставление, оформление протокола исследования и заключения [Саврасова и др., 2016; Глухова, 2022].

Особое значение для диагностики аномалий ЗЧЛС, как перед, так и в процессе ортодонтического лечения имеют компьютерная томография (КТ) ВНЧС, магнитно-резонансная томография (МРТ) ВНЧС, в зависимости от

характера жалоб [Хватова, 2001; Майборода, Хорев, 2017]. КТ считается одним из наиболее точных рентгенологических методов исследования ВНЧС в трех плоскостях, позволяющих оценить структуру костей, образующих сустав, и подтвердить его морфологические изменения [Фадеев и др., 2021]. К ограничениям КТ относят диагностику изменений внутрисуставного диска [Стяжкин, 2023]. Кроме того, т. к. костные изменения ВНЧС, как правило, проявляются на поздних стадиях заболеваний, и КТ не позволяют своевременно оценить характер и степень выраженности патологии ВНЧС [Фадеев и др., 2021; Черемных, Русских, 2021]. В компаративных исследованиях предпочтение отдается КЛКТ, в т. ч., как дополнительному методу диагностики [Гажва и др., 2017; Алидзе, 2019; Garstka et al., 2023]. Среди прочего он позволяет оценить размеры и форму головок нижней челюсти, суставной щели, суставных отростков, позицию в суставной ямке, провести анализ реконструктива ВНЧС и проч. [Фадеев, Кудрявцева, 2008; Tamimi, Hatcher, 2016]. Более высокий диагностический потенциал имеют методы 3D анализа ВНЧС на основе компьютерного моделирования [Ряховский, Бойцова, 2020; Ряховский, Выходцева, 2022; Ряховский и др., 2022, Начарьян и др., 2025; Начарьян и др., 2026].

Визуализировать мягкотканые структуры, изучить их состояние, плоскость ВНЧС позволяет *MPT*; с его помощью оценивают состояние внутрисуставного диска, выявляют его дислокации, выпот в полость сустава, изменения в суставных хрящах, мягкотканые опухоли ВНЧС и около челюстных тканей, состояние капсулярно-связочного аппарата ВНЧС и мышечного аппарата челюстно-лицевой области [Whyte et al., 2006; Шипика, 2012; Carlier, Quijano-Roy, 2014]. Метод имеет определенные преимущества перед другими рентгенологическими методами, в том числе в аспекте визуализации указанных структур, поскольку позволяет проводить исследование не только в статике (с открытым и закрытым ртом), но и в динамике [Ikeda, 2013; Ikeda, Kawamura, 2013]. Вместе с тем *MPT* имеет

достаточно ограниченный диагностический потенциал, поскольку, структуры твердых тканей содержат относительно низкую плотность протонов, что затрудняет получение необходимого сигнала при использовании данного метода [Gianluigi, 2009; Moncada et al., 2014]. Кроме того, метод МРТ ВНЧС не имеет стандартизированной методики выполнения исследования и анализа выявляемых нарушений, следовательно диагностический результат оказывается зависимым от интерпретации оператора [Силин и др., 2018; Okeson, 2019]. В данном случае неоспорима значимость предлагаемых методических инвариантов, в т. ч. предполагающие задействование цифровых технологий и 3D методов анализа [Юдин, Гетте, 2022]. Также отмечается высокий потенциал алгоритмов машинного обучения и сверточной нейросети [Агафонова и др., 2020]. В качестве смежных методов диагностики ВНЧС отмечается УЗИ [Костина, Кочмашева, 2016; Постников и др., 2020; Maranini et al., 2022]. Интерес также представляют разработки технологических решений (например, Fusion-технология), объединяющие для целей диагностики результаты наиболее популярных рентгенологических методов исследования ВНЧС (RU2800238C1).

1.1.4. Функциональные методы исследования

Наиболее объективным и надежным методом оценки функций ЧЛС и определения их электрических потенциалов считается электромиография/электронейромиография (ЭМГ/ЭМНГ); с ее помощью оценивают продолжительность мышечной (нейромышечной) активности для целей диагностики дисфункции ВНЧС, нарушения прикуса, бруксизма, заболеваний пародонта, прочих патологий ЗЧЛС, а также в целях планирования ортопедического лечения [Чуйкин и др., 2011; Ортодонтия. Национальное руководство, 2020; Аюпова и др., 2021]. Метод поверхностной ЭМГ основан на регистрации суммарных биопотенциалов мышц челюстно-лицевой области и периферических нервов в виде графического изображения в норме и при функциональных нарушениях ЧЛС. ЭМГ регистрируют в

физиологическом покое нижней челюсти, при сжатии челюстей в привычной окклюзии, производном и заданном жевании [Хватова, 2023]. Получаемые результаты позволяют оценить степень координации работы симметричных жевательных и височных мышц [Иванов и др., 2021; Булычева, 2022].

Диагностическая процедура проводится на стационарном или мобильном оборудовании, снабженном протоколами различных методик и, в ряде случаев, программируемыми автоматизированными функциями [Постников, 2016; Габдрафиков, 2021; Лян, 2021; Чепуряева, 2024]. Статистический анализ результатов исследования, как правило, выполнялся с помощью прикладных программ. Особый интерес здесь представляют результаты исследований проф. С.А. Апресяна и колл., предложивших решение для репрезентативного проведения ЭМГ жевательных и височных мышц, оптимизирующее процесс диагностики (RU2790546C1). Применение компьютеризированных комплексов при регистрации результатов ЭМГ дает возможность формировать массивы данных и проводить их статистико-математическую обработку [Гуськова и др., 2019]. Среди наиболее часто используемых в международной практике цифровых аппаратов – *BioEMG III* (Bioresearch, США) [Новик, 2022; Raaj et al., 2023].

Вместе с тем, по мнению ряда исследователей, современные миографы в той или иной степени характеризуются проблемами зашумленности сигнала и распознавания паттернов движения, снижающий информативность диагностических данных [Кузнецов и др., 2023]. Высокий потенциал в решении данных проблем имеют *методы машинного обучения*, которые позволят извлекать данные нормализованного сигнала из ЭМГ и генерализировать количественные параметры продолжительности мышечной активности и общей функциональной интенсивности [Farook et al., 2024]. Кроме того, в качестве недостатка метода отмечается отсутствие стандартизированного протокола выполнения исследования и анализа выявляемых нарушений, что дает возможность интерпретации результата

оператором [Лян, 2021]. К основным достоинствам ЭМГ относят малоинвазивность, доступность, возможность качественной регистрации исследований в виде таблиц и программ [Костромин, 2020].

Миотонометрия позволяет устанавливать степень функционального тонуса жевательных мышц по измерению их плотности в состоянии физиологического покоя и при максимальном сжатии зубных рядов. Метод определяет способность нервно-мышечной системы развивать напряжения данных мышц при сокращении [Аюпова и др., 2021]. Для диагностики применяется специальный прибор – миотометр. В настоящее время используются электро- и цифровые приборы с записью результатов измерения (тонус покоя и тонус напряжения, величины F, S, D, R, C) в энергонезависимую память устройства (например, «Миотон-3», Патент № 2447836). В российской практике большую приверженность имеет прибор SZIRMA (METRIMPEX, Венгрия) [Субботин и др., 2019; Балахничев, 2019; Кондратюк и др., 2020]; в международной – MyotonPRO (Myoton, Ltd., Великобритания; «Myoton AS», Эстония), как многофункциональному прибору цифровой пальпации с встроенным ПО, позволяющему проводить широкий спектр функциональных исследований [Шитова и др., 2020; Seo et al., 2023]. Данные считываются с прибора в компьютер, где программа производит запись, расчет и архивирование показателей миотонометра. В ручном варианте данные рассчитываются с использованием прикладных статистических программ. Особый интерес представляют мобильные приложения, разрабатываемые для оценки функционального состояния жевательной мускулатуры [Косолапова и др., 2022].

Аксиография и кондилография – это методы графической регистрации траекторий различных перемещений нижней челюсти в трех плоскостях по совокупности параметров (плавность, амплитуда, симметричность) [Cascone et al., 2014; Иваненко, 2019] с нахождением шарнирной оси и определения суставных углов [Антоник, Калинин, 2011; Косых, Ежицкий, 2019].

Процедуры необходимы для индивидуальной настройки артикулятора, составления плана ортодонтического и ортопедического лечения, а также наблюдения за динамикой после стоматологической реабилитации. Основным назначением аксиографии является оценка состояния ВНЧС на конкретный момент времени, его положения при выполнении основных движений нижней челюсти, с записью функциональных проб; цель кондилографии – измерение совместного пространства, т. е. трехмерной «игры» обоих ВНЧС в существующей бисфальной ситуации. Аксиография и кондилография могут проводиться с использованием *аналоговых, электронных и цифровых решений* [Булычева, 2007; Антоник, 2012; Истомина и др., 2015; Семкин, Сысолятин, 2019; Buduru et al., 2020; Султанов и др., 2021; Чхиквадзе и др., 2020; Goldstein et al., 2023; Хватова, 2023; Антоник и др., 2023].

1.1.5. Изучение состояния тканей пародонта

Пародонт – это совокупность тканей – десны, периодонтальной связки, альвеолярной кости и цемента корня, – окружающих и поддерживающих зубы [Рарарапou et al., 2018]. В современной клинической практике существует и применяется множество методов диагностики; среди них особое значение имеют оценочные индексы [Артюшкевич, 2006]. К их классическому набору относят: пародонтальный индекс PI (Индекс Рассела), индекс РВІ (Индекс Мюллеман-Коуэллоу), индекс РМА (папиллярно-маргинально-альвеолярный индекс, в т.ч. в модификации Парма), индекс гигиены ОНІ-S (Грин-Вермиллион), комплексный пародонтальный индекс (СРІТN) [Григорович, 2016; Алексеева, 2018; Архангельская, 2020; Самусенков, 2022]. Безусловно, система клинических индексов значительно шире [Адамчук и др., 2022; Самусенков, 2022].

На этапе планирования ортодонтического лечения во избежание пародонтических осложнений необходимо изучение исходной клинической ситуации в области каждого перемещаемого зуба. Так, знание толщины мягких тканей и объема костного субстрата позволяет избежать деструкции

тканей пародонта, рецессии десны и сохранить исходный объем кости альвеолярного отростка/части [Карпанова, 2022]. Фенотип десны и костная ткань могут быть оценены с помощью гистологических, ультразвуковых, рентгенологических методов, а также посредством компьютерной томографии, визуального осмотра и зондирования (инвазивного и неинвазивного) [Alves et al., 2018; Арсенина и др., 2020; Копецкий и др., 2020]. Как правило, используется комбинированный диагностический комплекс в целях повышения информативности пародонтологических параметров пациентов с аномалиями/деформациями ЗЧЛС, т. к. каждый метод в той или иной мере имеет ограничения в своем функционале [Арсенина и др., 2019].

Например, отмечается, что метод ультразвукового сканирования достоверен при исследовании только по центрально оси зуба, т. к. здесь имеет место твердое основание. В области десневых сосочков ультразвуковые волны рассеиваются и поглощаются мягкими [Шашурина, 2017]. Имеются сведения об оптимальности применения трансдесневого зондирования в сравнении с ультразвуковым исследованием в диагностическом комплексе при планировании лечения [Арсенина и др., 2019; Alizad-Rahvar et al., 2024]. Вместе с тем, от инвазивных методов диагностики современные ортодонты постепенно отказываются в силу недостаточной визуализации, болезненности и травматичности для пациента [Рыбаков, 2024]. Большую популярность приобретают атравматичные приборы. Так, представляет интерес аппарат Nu-Friedy COLORVUE BIOTYPE PROBE, различающий четыре вида фенотипа – тонкий, средний, толстый и очень толстый. Распознавание осуществляется путем просвечивания набором зондов (белым, зеленым и красным) [Rasperini et al., 2017; Карпанова, 2022]. Методика, предложенная Д. Расперини и колл., решает проблему достоверности клинической оценки фенотипа десны ортодонтических пациентов, которую не позволяла решить простая классификация фенотипа десны на толстый и тонкий [Rucha et al., 2016; Amid et al., 2017]. Метод просвечивания пародонтального зонда через десну, как

отмелось в ранних исследованиях, не позволял учитывать переходный тип десны, а следовательно, провести количественные измерения.

Интерес также представляет решение, предложенное А. А. Стафеевым и колл., предполагающее применение 3D технологий. Изобретение предполагает синтез КЛКТ с внутриротовым сканированием и совмещением в последующем данных в диагностической программе Avantis 3D или Exocad (RU2799816C1). Метод позволяет проводить измерения на срезах во фронтальных и сагиттальных плоскостях в областях, соответствующих вестибулярным кортикальным пластинам лунок исследуемых зубов, в проекции центральной оси зуба, от вершины кортикальной пластины до мукогингивального соединения. Об эффективности использования внутриротового сканирования и 3D моделирования, в синтезе с другими методами определения фенотипа десны свидетельствуют результаты последних исследований [Fageeh et al., 2019; Lim et al., 2021].

Относительно недостатков способов оценки костной ткани, то, например, ортопантомография, как стандартный метод рентгенологического исследования, не дает достаточной информации о топографо-анатомическом строении пародонта и не позволяет оценить объем компактной пластинки альвеолярной кости, что необходимо для планирования торка при ортодонтическом перемещении зубов. Кроме того, отмечается высокий процент (до 60%) расхождения клинических данных при использовании данного метода [Грудянов, Ерохин, 2006; Васильев и др., 2010; Алимова, Ерохин, 2010]. Доказательно большей эффективностью обладает 3D КТ, поскольку метод обеспечивает визуализацию метрических характеристик костных структур, а следовательно, позволяет определить возможность и (или) оптимизировать объем ортодонтического перемещения зубов [Алимова, 2016; Арсенина и др., 2020; Карпанова и др., 2022]. В ряде исследований отмечается актуальность метода остеоденситометрии для оценки плотности/прочности костной ткани альвеолярного отростка/части в целях

планирования лечения с учетом прогноза развития осложнений [Щербич, 2010; Шаймарданов, 2018]. Комплексный подход и к диагностике фенотипа десны, и оценки костной ткани предполагает КЛКТ, оптимально с использованием решений, предполагающих 3D моделирование (например, Planmeca ProMax 3DProFace) [Das et al., 2022; Zaragoza Ballester et al., 2023].

Функциональное состояние тканей пародонта изучается такими методами, как биоикроскопия, реопародонтография, фотоплетизмография, гнатодинамометрия, радиоизотопный метод и проч. [Бархатов, 2014; Македонова и др., 2016; Kocasarac, Angelopoulos, 2018; Narang, 2022]. Реопародонтография считается одним из наиболее показательных экспресс-методов оценки состояния сосудов тканей пародонта путем регистрации в них потока крови [Раджабова, Абдулмеджидова, 2013; Persin et al., 2019]. Суть метода заключается в регистрации изменения полного электрического сопротивления тканей, вызванного пульсовыми колебаниями кровенаполнения сосудов. При оценке результатов учитывается форма кривой, амплитудно-частотные характеристики, а также расчетные показатели пульсового объема кровотока ткани [Амхадова и др., 2019; Aliev, 2021]. Запись реограммы проводят на реографе с ПО, используя шаровидные электроды в исследуемой области (метод проф. Л.С. Персина) [Ступницкий, 2022]. В качестве недостатков отмечается низкая специфичность и ограниченная область применения [Ступницкий и др. 2018, Картышева, 2019; Ступницкий и др., 2019, Геращенко, Демидов, 2023].

Относительно инновационным в сфере изучения состояния тканей пародонта является метод биоимпедансного анализа. В общем случае он направлен на измерение электрической проводимости биологических тканей с целью оценки широкого спектра морфологических и физиологических параметров организма [Гайворонский и др., 2017; Деньга, 2020]. Применение *биоимпедансной спектроскопии* в рассматриваемой области малоизучено; данное направление развивается О.Н. Московец и О.О. Московец [Moskovets

et al., 2007; Moskovets et al., 2019; Ступницкий и др., 2019; Московец и др., 2021]. О.О. Московец оценивала показатели функционального состояния пародонта по данным биоимпедансного анализа по двум показателям – степень гидратации и регенерационная способности тканей пародонта, – и периотестометрии, для выявления повышенных механических напряжений в тканях пародонта. Для целей получения более достоверный результатов оценки результатов ортодонтического лечения, используемый автором прибор ABC-02 (с ПО ABC02-038) был откалиброван на выявление сниженной гидратации тканей, что было необходимо для определения наличия механических повреждений в тканях пародонта у пациентов с дистальной окклюзией, а по показателю регенерационной способности – преобладание процессов резорбации или остеогенеза [Московец, 2020; Московец, 2021].

1.2. Цифровые методы планирования ортодонтического лечения

Специфика ортодонтического лечения заключается в том, что непосредственное изготовление коррекционных конструкций проводится зубным техником в ортодонтической лаборатории по рабочим гипсовым моделям / их цифровым оттискам (с использованием лабораторных сканеров) или по оптическим слепкам, получаемых с использованием лабораторных/внутриротовых сканеров. Его основным отличием от аналоговой модели является трехмерность, когда каждая точка поверхности имеет свои четкие координаты в трех взаимно перпендикулярных плоскостях [Полховский, 2008]. К *их преимуществам* относятся: минимизация неприятных ощущений для пациента, отсутствие усадки оттисковой массы и расширения гипса, быстрое получение слепка, бесконтактная передача оттиска в лабораторию, сокращение сроков диагностики и изготовления ортодонтической конструкции с оптимальным окклюзионным контактом, краевым прилеганием и четкими интропроксимальными контактными поверхностями [Patzelt et al., 2013; Mangano et al., 2017; Hack et al., 2020;

Zarbakhsh et al., 2021; Негрескул и др., 2022; Saccomanno et al., 2022; Saravi et al., 2023].

На современном рынке представлен широкий спектр контактных *in vitro* и бесконтактных *in vivo* сканеров, позволяющих получить качественный оптический слепок [Pahuja et al., 2023]. Они позволяют отказаться от методик снятия аналоговых оттисков, быстро и точно сканировать зубы и зубные дуги согласно методике-протоколу производителя, полученную информацию регистрировать в формате STL и вместе с данными е-лицевой дуги переносить в модуль виртуального артикулятора для проектирования ортодонтической конструкции в CAD/CAM системе. Основным недостатком сканирующей аппаратуры, как правило, называется ее высокая себестоимость [Вакушина и др., 2019; Hadadpour et al., 2019; Иванов и др., 2021; Almqrami et al., 2021; Арсенина и др., 2022; Вакушина и др., 2022; Мохирев и др., 2022; Хаджаева, 2022]. Наиболее быстрыми точными считаются аппараты 3Shape [Костюкова, 2017; Lee, 2018; Pellitteri et al., 2022; Angelone et al., 2023; Ермаков, Лосев, 2023], тогда как более функциональным – аппараты Planmeca [Schlenz et al., 2022]. В российской источниковой базе также обнаруживаются доказательства большей компаративной эффективности сканеров CEREC [Бородина и др., 2022; Рыбаков, 2024].

Особый интерес представляют компаративные исследования, оценивающие интраоральные и лабораторные сканеры относительно точности получаемого оптического слепка (прецизионность и истинность). Так, Р.А. Розов и соавт., сравнивая результаты сканирования контрольной модели, созданную с использованием программы ExoCAD и 3D-принтера FormLab, четырьмя интраоральными сканерами (Identical500, MyCrownScan, PlanScan, TriosWireless) и тремя лабораторными сканерами (IdenticalHybrid, OpenTechnologiesEasy/Neway) и пришли к заключению о том, что наиболее высокую точность показал OpenTechnologiesEasy (53,9 мкм); в группе контактных аппаратов лидирующие позиции сохранил TRIOS3 Wireless

(3Shape) (82,6 мкм) [Розов и др., 2020]. Подобное исследование, проведенное Р. Нацубори и соавт. также указывает на приоритет лабораторных сканеров; по аналогичной схеме авторы сравнили два интраоральных (3M True Definition Scanner, 3Shape Trios3) и два стационарных сканера (KaVo ARCTICA Auto Scan, Identica Hybrid) [Natsubori et al., 2022]. К аналогичным выводам приходили и другие исследователи [Park et al., 2019].

Сканирование предполагает несколько методов получения оптического (цифрового) слепка: фотограмметрия, триангуляции (PlanScan, Cerec ACBluescam), голография (DSi 6000, Optimet, Польша), конфокальная микроскопия (Trios, iTero), активная выборка волнового фронта (Lava C.O.S. 3M, Сант Пол, США), метод четырехракурсной проекции параллельных полос в конусных лучах (ОптикДент, ВНИИОФИ, Россия), полноцветное непрерывное изображение (CerecOmnicam – Sirona Dental System GMBH, Германия). Метод триангуляции предполагает сканирование при помощи лазерного луча, который исходит из излучателя и, отражаясь от поверхности объекта, проецируется на CCD-матрицу. Поскольку известны одна сторона, один угол (зарегистрированный угол) и величина зафиксированного угла между ней и излучателем, расстояние до объекта может быть рассчитано. В результате сканирования оптический оттиск зубных рядов состоит из соединенных между собой точек, образующий поверхность, состоящих из множества небольших треугольников [Меженин, Тозик, 2008; Ибрагимов, Цаликова, 2013; Brawek et al., 2013; Шадрин, 2020]. Метод коноскопической голографии алгоритмически идентичен методу триангуляции, разница лишь заключается в монотраекторном движении проецируемого и отраженного лучей, что позволяет сканировать ротовую полость пациента с вертикально наклоненными стенками (до 85° против $40-60^\circ$, доступных при использовании метода триангуляции). Поляризованный свет или свет, проходящий через дифракционную решетку, образует на поверхности объекта голографические кольца, определяющие уровни высот. Расстояния между данными кольцами

определяются перепадом высот и длиной световой волны [Наумович, 2009; Burgner et al., 2013; Richert et al., 2017; Khairy, 2023].

Метод фотограмметрии предполагает регистрацию положения проецируемого на сканируемый объект множества полос света (лазерного, инфракрасного, видимого) с использованием цифровой камеры. Координаты точек поверхности рассчитываются из расстояния между данными полосами. Данный метод сканирования применяется во всех современных CAD/CAM системах и позволяет получить цифровой оттиск и создать точный оптический слепок [Полховский, 2008; Вишняков, Лоцилов, 2011; Рудаков, 2013; Козин и др., 2019; Veri et al., 2022]. Метод конфокальной микроскопии также предполагает проекцию лазерного луча (красного) на сканируемый объект. Отраженный луч (фиолетовый) проходит после светоделителя через фокальный фильтр таким образом, что только лежащее в фокусной точке линзы изображение может проецироваться на датчик. Расстояние между объектом и линзой рассчитывается исходя из фокусного расстояния. Сканирование объекта осуществляется в результате перемещения линзы вверх-вниз, которая проецирует его часть на датчик [Birnbbaum et al., 2009; Kim, 2012; Kim et al., 2014; Хисматуллина и др., 2021; Дякин, Зубкова, 2021]. Метод активной выборки волнового фронта предполагает прохождение отраженного от зубов изображения через систему линз и проецирование его через датчик. Расстояние до объекта будет совпадать с фокусным расстоянием линзы, если изображение будет в фокусе; в обратном случае (нефокус) расстояние от объекта до линзы вычисляется математически по размеру размытого изображения [van der Meer et al., 2012; Yuzbasioglu et al., 2014; Mangano et al., 2017].

Цифровой протокол ортодонтического лечения также предполагает получение оптических слепков лица и головы, получаемых в результате сканирования на специальной аппаратуре [Лесняков и др., 2016; Апресян, 2020; Lin et al., 2023]. С помощью лицевого сканера (или мобильного

приложения, например, Bellus3D Dental Pro [Thurzo et al., 2022]) создаются 3D-сцены результатов комплексного цифрового планирования лечения и визуализации их пациенту для обеспечения гарантии удовлетворенности функциональными и эстетическими его результатами. Точный оптический слепок лица и головы повышает совокупную диагностическую ценность иных антропометрических исследований. Кроме того, используя современные аппараты, возможно изготавливать качественные индивидуальные ортодонтические конструкции с учетом физиогномики пациента [Ортодонтия. Национальное руководство, 2020; Апресян, Степанов, Антоник и др., 2020]. Дальнейшее сопоставление скана лица с 3D сканами зубов дает возможность настроить виртуальный артикулятор согласно клинической ситуации [Joda et al., 2015; Vynum, Mirelez, 2021; Thurzo et al., 2022; Lee et al., 2022].

С. В. Апресяном и колл. был предложен метод сопоставления КТ (КЛКТ) и лицевых 3D сканов для получения точного оптического слепка лица и головы. Его основная идея заключается в объединении данные по реперным объектам, в качестве которых использовались 4 шарика из самотвердеющего полиметакриатного материала диаметром 5 мм. Шарик прикрепляли к мягким тканям лица. Для точности совмещения 3D-сканов с данными КТ выбирались 4 точки на лице пациента, куда прикреплялись шарик. Съемка производилась с помощью трех устройств 3dMDFace System (3dMD, США/Великобритания), ObiScanner (Fifth Ingenium, Италия) и Einstar (Shining 3D, Китай). Данных КТ с лицевыми 3D-сканами совмещали в программе Exocad. В качестве эталона для исследования была выбрана модель, полученная с помощью аппарата Planmeca ProMax 3D ProFace, поскольку в данной системе аппарат выполняет КТ с применением конусного луча (CBVT) со встроенной системой трехмерного сканирования лица. Наиболее четкое точное изображение, при совмещении с данными КТ, по мнению авторов, дает устройство ObiScanner [Апресян, Степанов, Зражевская, 2023].

Для цифрового планирования ортодонтического лечения также требуется результат КЛКТ. Данная процедура проводится в соответствии с *протоколом* проф. Д. Уэема: сперва проводится скрининг патологии, далее оцениваются дыхательные пути, количество и положение зубов, окклюзия, толщина высоты кортикальной пластинки вокруг зубов, трансверсальный наклон моляров, ВНЧС; процедура завершается 3D цифалометрией и оценкой асимметрии [De Vos et al., 2009; Hans et al., 2015]. На КЛКТ оцениваются все анатомические структуры челюстно-лицевой системы в трех плоскостях, выявляются анатомические особенности пациента. Определяются положение и наклон зубов, зубоальвеолярных дуг и челюстей, расположение и объем альвеолярной кости, уровень твердых тканей пародонта, состояние ВНЧС, верхнечелюстных пазух, просвет дыхательных путей [Хвостенко, 2023]. По данным КЛКТ также проводится измерение степени сужения верхней челюсти [Махортова, 2020; Попова, 2020]. В ряде исследований последних лет делается акцент на методе микрофокусной КЛКТ [Васильев, 2015; Клестова и др., 2016; Петровская, 2016; Diab et al., 2016; Соколова и др., 2017; Тарасенко и др., 2017; Староверов и др., 2018; Balasuriya, Doyle, 2019; Петровская и др., 2019; Ничипор, 2021].

КЛКТ производится с использованием КЛ-томографов. Их ПО делает возможным построение объемного изображения, позволяющего виртуальное исследование челюстно-лицевой системы пациента, в также просмотр видеофильма с вращением объекта вокруг любой из осей. На получаемых 2D/3D-реформаторах определяется денситометрическая плотность костных и мягких структур, проводятся угловые и линейные изменения «зон интереса» краниофациального комплекса, планируется ход оперативных вмешательств [Vasilakos et al., 2018; Ланина, 2019; Giudice et al., 2020; Седов и др., 2021; Басиева, 2022; Дмитриенко и др., 2022; Ищенко, Потапов, 2022]. Анализ существующих компаративных исследований не позволяет заключить о большей эффективности/функциональности того или иного аппарата [van Groningen et al., 2016; Степанян, 2019]. Однако, для целей клинических

исследований чаще выбираются томографы Planmеса (например, Planmеса ProMax 3D Mid, Финляндия [Хвостенко, 2023; Гаврилова, 2023]). Фреймворк анализа рентгенологических данных, согласно описанной выше методике, как правило осуществляется ручным или полуавтоматическим способом, с задействованием компьютерных программ-подсмотрщиков (Ez3D-I, Planmеса Romexis и проч.). Вместе с тем в последние годы отдается предпочтению ИИ-алгоритмам, позволяющих автоматизировать все аналитические процедуры, повышая их качество. Кроме того отмечается, что, например, при использовании методики ИИ, КЛКТ повышает выявляемость периапикальной патологии [Pirilä-Parkkinen et al., 2011; Lee et al., 2020; Diaconu et al., 2022].

В современной литературе, как правило говорится о двух программных решениях, позволяющих автоматизировать распознавание стоматологических изображений – Dentomo и Diagnocat. Сравнительных исследований, позволяющих говорить о большей эффективности/функциональности одной из них не найдено. В докторской диссертации С. В. Апресяна была подтверждена валидность программы Diagnocat [2020]. Обе программы функционируют на базе сверточных нейросетей, считающиеся перспективными для проведения анализа КЛКТ и других рентгенограмм [Gerhardt et al., 2022; Abesi et al., 2023; Lee et al., 2024]. Например, исследование П.-Я. Верхельста и колл. показывает, что многоуровневые сверточные нейронные сети, использующие архитектуру решения 3D U-Net, позволяют выполнять прямую сегментацию изображений КЛКТ с высоким разрешением [Verhelst et al., 2021]. Однако, имеются и исследования, указывающие на наличие погрешностей при проведении ИИ-измерений [Wang et al., 2021]. В связи с этим, ИИ требует постоянной проверки и контроля со стороны человека во избежание получения неверных результатов диагностики [Traebert, et al., 2020]. Таким образом, применение указанных и иных решений для целей планирования лечения может иметь исключительно вспомогательный характер.

Актуальным цифровым решением регистрации движения нижней челюсти является виртуальный артикулятор. Виртуальный артикулятор – это цифровой программный инструмент планирования ортодонтического лечения, позволяющий демонстрировать биомеханику зубочелюстной системы, воспроизводя взаимосвязь между верхней и нижней челюстями и имитируя их движение в целях динамической визуализации окклюзионных контактов. Сравнительные исследования указывают на возможность виртуальных артикуляторов оценки динамической окклюзии при открывании и закрывании рта, протрузии и латеротрузии, непрерывном движении нижней челюсти с регистрацией всех возможных зубных контактов [Чхиквадзе и др., 2020; Выходцева, 2023; Doshi et al., 2024]. Как правило, виртуальные артикуляторы встроены в качестве функциональных модулей в программы планирования стоматологического лечения, таких как Exocad DentalCAD и Aventis 3D. В ряде исследований отмечается решение программное Zirkozahn. Сравнительных исследований не найдено не было.

Система использует в качестве входных цифровые трехмерные модели зубных рядов и данные о движении челюсти пациента, полученные по результатам аксиографии. VR-инструменты позволяют визуализировать движения суставных головок нижней челюсти в различных проекциях, параллельно наблюдая изменения окклюзионных взаимоотношений. В настройках модуля задаются индивидуальные параметры или усредненные (среднеанатомические) параметры [Апресян, Степанов, Сопоцинский, 2020]. Интерес представляют исследования, доказывающие возможности применения роботизированных технологий в практике регистрации движения нижней челюсти [Carossa et al., 2020].

Сопоставить цифровые модели в виртуальном артикуляторе позволяет цифровая передача из цифровой лицевой дуги Роцина. Аналоговым ее предшественником является технология Kois Dento-Facial Analyzer (DFA), разработанная доктором Дж. Коисом [Lux et al., 2015; Brenes et al., 2018;

Осипов и др., 2024]. В начале 2010-х гг. Е. М. Роциным и соавт. был получен (RU2015154805A) патент и разработан аппарат нового поколения Dentograf (Prosystom). Аппарат основан на синхронизации анатомических данных, полученных с помощью КТ нижней челюсти, и данных зубочелюстной системы при сканировании гипсовой модели челюсти или внутриротового сканирования, и записи движения нижней челюсти. Шарнирная ось, как правило, определяется по верхнему краю мышечкового отростка [Пархамович и др., 2020]. Однако, Е. М. Роцин указывает на возможность ее определения по любому анатомическому ориентиру или ее расчета программой при сравнении и совмещении графиков протрузии и открывания [Роцин и др., 2011]. Запись функциональных данных производится при помощи видеокамеры, установленной на голове пациента и специальных маркеров, приклеенных на зубы верхней и нижней челюстей. Перенос получаемых данных аксиографии о шарнирной оси и саггитальном суставном пути осуществляется в аналоговый/виртуальный артикулятор.

Таким образом зародилась концепция функциональной индивидуально-воспроизводимой артикуляции F.I.R.A., основанная на применении брендовой диагностической инфраструктуры, включая (в последующем) программный комплекс P-Art, который позволяет совмещать виртуальные модели челюстей с траекториями движений нижней челюсти в виртуальном артикуляторе [Григоренко, 2024]. Наконец, в начале 2020-х гг. Е. М. Роциным был презентован *оптический аксиограф Proaxis*, представляющий собой самое современное устройство регистрации движений нижней челюсти (ВНЧС и резцов), позволяющее визуализировать предполагаемое (прогнозируемое) положение челюсти по завершении лечения. Данные регистрируемых показателей обрабатываются в программе Prosystom и направляются в зуботехническую/ортодонтическую лабораторию. Одним из достоинств данной программы является учет биомеханических характеристик

зубочелюстного аппарата, отсутствующий у большинства программ планирования лечения [Апресян, Степанов, Антоник и др., 2020].

В настоящее время существует и применяется достаточно ограниченный спектр программ планирования комплексного ортодонтического лечения [Арутюнов и др., 2019; Апресян, Степанов, Сопоцинский и др., 2020; Апресян, Степанов, 2022]. Так, крупнейшей специальной прикладной программой является решение ClinCheck (Align Technology, Сан-Хосе, Калифорния, США). При помощи программы возможно создание виртуального индивидуального плана ортодонтического лечения (элайнеры Invisalign). Контролировать ход лечения позволяет созданная совместно с пациентом 3D-визуализация выравнивания и перемещения зубов с возможностью выбора направления и градуса передвижения каждого зуба. Для направления заказа на производство в программу загружаются план лечения, внутриротовые фотографии пациентам и ортопантограмма. В последние годы проводится множественные исследования, целью которых является оценка точности прогнозируемого программой результата и фактического, предоставляемого ClinCheck. В большинстве из них указывается на различия [Castroflorio et al., 2023]; называется цифра 50–59% как средний показатель количества ошибок системы [Tsoulakis et al., 2022]. Однако, также имеются и данные, свидетельствующие о высокой точности прогнозирования с помощью ClinCheck [Пилипенко, Максуюков, 2021; Adobes Martin et. Al., 2022].

Крупнейшей междисциплинарной программой комплексного стоматологического лечения является Avantis 3D, разработанная проф. А.Н. Ряховским. Ее основным достоинством является возможность проведения точной диагностики состояния зубных рядов и состояния ВНЧС, а также терапевтического позиционирования нижней челюсти для проведения дальнейшего планирования стоматологического (ортодонтического) лечения с учетом эстетики лица пациента. Для целей *планирования ортодонтического лечения* используется три модуля – «Орто-дизайн» (предназначен для

планирования выравнивания зубов, проектирования моделей, создания ретенционной модели, расстановки брекетов, разработки коррекционного сценария), «Гнато-Студия» (предназначен для диагностики и планирования лечения при патологиях ВНЧС), «Ортогнатика» (предназначен для планирования перемещения челюстей пациента, проведения предоперационного анализа ортогнатической операции) и «План лечения» (в нем представлена возможность проектирования концепции 4D – в пространстве и во времени). С их помощью возможно планировать выравнивание ЗЧЛС с автоматическим проектированием моделей челюстей для изготовления ортодонтических конструкций, планировать проведение костно-реконструктивных операций и проектировать специальные хирургические шаблоны и позиционеры и проч.

Рассматриваемая программа в сравнительных исследованиях не участвовала, однако анализ литературы указывает на ее повсеместное использование. Ф.Ф. Лосев и соавт. и соавт. использовали Avantis 3D для определения оптимальных костных зон для позиционирования ортодонтических мини-винтов и планирования перемещения зубов [2022]. Э. В. Басиева при клиническом наблюдении с помощью данной программы индивидуально спроектировала окклюзионную капу 102 пациентам, прошедшим ортодонтическое и остеопатическое лечение, в конструкционном положении нижней челюсти по данным КЛКТ ВНЧС [2022]. Н. М. Сафронова использовала Avantis 3D для планирования ортодонтического лечения пациентов со скученным положением зубов с использованием корригирующих эластомерных кап [2014]. И. М. Шабалина апробировала запатентованную адаптационную съемную капу, которая стала частью алгоритма использования дигитальных технологий в ортопедической и ортодонтической стоматологии с применением новых методов диагностики для лечения взрослых пациентов с сочетанными аномалиями окклюзии и сахарным диабетом II типа [2021]. А. С. Карпанова указывает, что Avantis 3D

является единственным решением, которое позволяет врачу в клиническом случае тонкого фенотипа десны и дефектах кости альвеолярного отростка, спланировать лечение, учесть исходные параметры анатомии тканей пародонта и не вывести корни зубов за пределы альвеолярного отростка. Автор провела 3D моделирование лечения пациентов с аномалиями положения зубов и различным фенотипа десны [2022].

Заслуживает внимания и программный комплекс 3Shape. Модуль Ortho System, специально созданный для планирования ортодонтического лечения, включает в себя три платформы: OthoAnalyzer, Appliance Designer и Control Panel. Первая платформа, как следует из названия, предназначена для проведения различных диагностических измерений и далее виртуальной симуляции планируемого лечения, в т. ч. с вариантом удаления зубов. Для комфортного использования, в нее включены два модуля – Clear Aligner Studio, предназначенный для контроля над проектированием лечения, в т. ч. над последовательностью передвижения зубов, и расчета количества элайнеров, и Indirect Bonding, включающий в себя большую библиотеку брекетов и позволяющий управлять их позиционированием, а также моделированием каппы для непрямой фиксации. При помощи второй платформы возможно сконструировать окклюзионные шины (модуль Splint Studio), ночные каппы, ретейнеры, индивидуальные ортодонтические кольца, небные расширители, бионаторы, Твин-блоки, ортодонтические опоры (мини-винты), аппараты Гербса и проч., что выгодно отличает программу 3Shape от других решений планирования комплексного ортодонтического лечения. На платформе также представлены библиотеки аттачментов, виртуальных артикуляторов, инструментов скульптора и проч. На третьей платформе располагаются настройки системы, библиотека ортопедических конструкций, хирургических абатментов, ортодонтических элайнеров.

В силу своей многофункциональности и междисциплинарности, 3Shape является участником многих сравнительных исследований [Liang et al., 2018;

Eid, Elhiny, 2021], некоторые из них процитированы в настоящей работе. Из последних можно привести исследование К.И. Хаммам и соавт., которые сравнивали функциональные возможности четырех программ планирования ортодонтического лечения с использованием прозрачных элайнеров: Maestro 3D Dental Studio, 3Shape Ortho system, BlueSky bio и Romexis 3D Ortho Studio. Статистически значимых различий между ними выявлены не были, однако, BlueSky bio продемонстрировала простоту управления рабочим процессом планирования, благодаря оптимальному расположению инструментов и опций; Romexis 3D Ortho Studio показала самые высокие результаты по их количеству в управлении бизнес-процессами планирования; управление заказами Maestro 3D Dental Studio было самым сложным среди тестируемых программ [Hammam et al., 2024]. 3Shape Ortho system, как правило, составляет инфраструктурный комплекс программ, подбираемых для решения ортодонтических задач [Camardella et al., 2017; Sedtasuppana et al., 2017; Eid, Elhiny, 2021]. Фактически, не одна программа цифрового планирования не может быть использована для целей реализации одновременно всех этапов лечения, поэтому отбор должен осуществляться в зависимости от клинической ситуации и возможностей специалиста.

1.3. Цифровые и аналоговые методы ортодонтического лечения

Современные методы лечения зубочелюстных аномалий (деформаций) подразумевает широкое применение ортодонтических/ортогнатических конструкций/аппаратов. Выбор той или иной конструкции/аппарата зависит от клинического случая, возраста пациента, типа роста лицевого скелета, эстетических лицевых параметров пациента и степени его мотивации к лечению [Данилова и др., 2014; Арсенина и др., 2019; Жмырко и др., 2020; Гажва и др., 2021; Лосев и др., 2022]. Изготовление ортодонтических/ортогнатических конструкций для лечения (коррекции) зубочелюстных аномалий (деформаций) может происходить при помощи аналоговых и (или) цифровых технологий. Аналоговые методы предполагают

изготовление корректирующей конструкции в несколько (от 4 и более) клинических этапов, начиная со снятия физического слепка зубных рядов и создания гипсовой контрольно-диагностической модели (DPM), завершая ручной формацией/отливкой конструкции специалиста зуботехнической/ортодонтической лаборатории. В настоящее время аналоговые методы ортодонтического лечения в чистом виде не применяются; большая часть процессов в той или иной степени осуществляется с применением цифровых методов, что позволяет упростить *процесс цифрового планирования (CAD) и изготовления корректирующей конструкции (CAM/3D-печать)*, сократив тем самым количество посещений пациента (до 2-3), соответственно, период лечения и его общую стоимость [Bonnet et al., 2017; Han et al., 2017; Lo Russo et al., 2018; Lee et al., 2019; Schlenz et al., 2020; Негрескул и др., 2022; Saccomanno et al., 2022].

Более существенными преимуществами цифровых методов изготовления ортодонтических конструкций является повышения качества готового продукта, обеспечиваемое практически полным исключением человеческого фактора за счет автоматизации производственного процесса, а также возможность повторного использования цифровых данных (полученных на этапе диагностики, планирования и реализации (промежуточный контроль) лечения) в случае необходимости коррекции или изготовления новой ортодонтической конструкции, а также при необходимости повторного/последующего ортодонтического лечения, а также при подготовке к протезированию малоинвазивными конструкциями, дентальной имплантации и проч. [Марков, 2019; Гордиенко, 2019; Арсенина и др., 2023]. К цифровым методам изготовления ортодонтических конструкций относят: *аддитивные технологии* (прототипирование) и *субтрактивные технологии* (фрезерование), которые входят в CAD/CAM технологии (например, Ceres, Cercon, 3Shape, Katana, Exocad и проч.). Субтрактивные технологии предполагают применения фрезерных станков в числовым ПО, аддитивные –

3D-принтеров. Субстративные технологии работают по принципу получения необходимой корректирующей конструкции путем удаления материала с заготовки, аддитивные – путем нанесения слоев материала равной толщины на основе его цифровой модели [Апресян С.В., Степанов и др., 2021; Dzhahalova et al., 2023; Апресян С.В., Степанов и др., 2023; Апресян С.В., Степанов А.Г., Суонио и др., 2023; Верховский и др., 2023; Джалалова и др., 2023].

Практически полный переход к аддитивным технологиям в настоящее время осуществило производство элайнеров; это съемный ортодонтический аппарат, изготавливаемый из прозрачного пластика методом термоформирования в аппаратах для прессования под давлением или в условиях вакуума. Их основным достоинством является отсутствие отрицательного воздействия на эмаль зубов, т. к. отсутствует необходимость к фиксации элементов, как в случае с брекет-системами, на поверхности зубов, а следовательно, и последующий демонтаж. Кроме того, указывается на принцип передвижения зубов, позволяющий распределять и направлять вектор перемещения вдоль оси зубов, двигая их внутри челюсти и формируя вокруг них новую костную ткань. Дополнительно могут применяться ретенционные элементы – *аттачменты*, состоящие из композитного материала и фиксирующиеся на зубах через специальную матрицу из мягкого пластика [Eliades et al., 2020; Weckmann et al., 2020; Ayidağa, Kamiloğlu, 2021]. Отмечается, что с аттачментами более эффективно дистализировать моляры [Зубков и др., 2020; Liu et al., 2022; Baneshi, 2024].

Производство элайнеров началось в 1988 г., когда американская компания Align Technology создала систему капп «Invisalign». Тогда спектр решаемых с помощью элайнеров задач был относительно узким, а конструкции производились методом вакуумной формовки пластиковой пластины по физической модели после перемещения [Антосик, 2018]. С появлением субстративных и аддитивных технологий данный процесс стал более технически, экономически и клинически эффективным. Особый интерес

представляет так называемая *DPM-технология* (англ. dynamic physical model); ортодонтические конструкции производятся по запатентованной технологии мини-пинов, позволяющих перемещать зубы в нескольких плоскостях. Согласно протоколу, для передвижения готовится модель из пластифицированного гипса по оттискам зубных рядов пациента, сопоставленных в регистре прикуса, которая затем обжимается силиконом, формируя каппу соответствующего этапа. По данной технологии производятся, например, элайнеры Ortho Snap (США).

Имеются исследования, подтверждающие, что применение DPM-технологий при производстве элайнеров позволяет получить более точный (с минимальной погрешностью) и экономически эффективный продукт, в сравнении со способом, предполагающим применение 3D-технологий [Антосик, 2018]. Однако, авторы компаративных исследований сходятся во мнении о том, что многое зависит не только от самой технологии, но и оборудования, и материала, используемого для производства ортодонтической конструкции. Так, отмечается, что изготовление элайнеров по цифровым моделям, созданным на основе гипсовых моделей, имеет множество неточностей, особенно для сложных клинических случаев [Ko et al., 2018; Tang et al., 2022; Keilig et al., 2024]. В отсутствие же цифровой инфраструктуры, оттиски рекомендуется получить с применением А-силиконовых и полиэфирных оттисковых масс [Дегтев и др., 2021; Elmoutawakkil et al., 2022; Madanshetty et al., 2023]. Однако, как уже было указано выше, оптимальным решением является работа с оптическими оттисками пациента. Исследования, посвященные теме лечения зубочелюстных аномалий с применением элайнеров рекомендуют программные комплексы Maestro Studio CAD/CAM, Dental CAD (Exocad), Deltaface CAD (Coruo), 3Shape Clear Aligner Studio, Blue Sky Plan (Blue Sky Bio), uDesign 7 (uLab Systems Inc.), CS Model+ (Carestream Dental), MeshMixer

(Autodesk Inc.) [Nakano et al., 2019; Jindal et al., 2020; McCarty et al., 2020; Zinelis et al., 2022; Rajasekaran, Chaudhari, 2023].

Изготовление элайнеров в настоящее время осуществляется субстративными методами с применением технологии термоформирования в аппаратах для прессования под давлением или в условиях вакуума производится с применением термопластичных полимерных пластин различной толщины. Данный подход используют Invisalign (Align Technology, Калифорния, США), K-line (K Line Europe GmbH, Германия) и ClearCorrect (Страуманн, США) и другие бренды. Имеются исследования, указывающие на погрешность толщины конечного продукта, производимого фрезерным методом. Ее отсутствие является одним из главных критериев переориентации производства на аддитивные технологии [Bucci et al., 2019; Ihssen et al., 2021; Dalaie et al., 2021; Golkhani et al., 2022].

Кроме того, указывается, что при производстве ортодонтических конструкций способом 3D-печати применяются высокоточные и пластичные материалы на основе биосовместимых смол, создаваемые на основе виртуального сетапа [Lee et al., 2022; Can et al., 2022; Willi et al., 2022; Саркисов и др., 2024]. Так, элайнеры 3D Smile изготавливаются из поликарбоната. Новацией является биологически совместимый материал класса IIф – NextDent Ortho Clear; он имеет прозрачную структуру и практически незаметен на конструкции, высокую прочность на изгиб и на ударную нагрузку, отличается высокой износостойкостью, в сравнении с аналогами [Рубникович и др., 2023]. Однако, на сегодняшний день отсутствуют достоверные результаты клинических исследований, объективно указывающие на эффективность данного или иного материала (по физическим свойствам), равно как 3D-аппаратуры, среди прочего гарантирующей стабильность толщины ортодонтической конструкции [Рыбаков, 2024].

Терапия элайнерами включает в себя широкий спектр съемных ортодонтических конструкций с различными режимами ношения, что

позволяет решать многие клинические случаи зубочелюстных аномалий [Roberts-Harry, Sandy, 2003; Рыбаков, 2024]. Вместе с тем, отмечается, что при помощи элайнеров сложно произвести экструзию, нормализовать торк зубов. Согласно имеющимся данным, эффективность лечения элайнерами составляет 59%, тогда как эффективность дистализации верхнего моляра на 1,5 мм составляет 88%. Это одна из причин приверженности современной клиники к применению элайнеров для доведения ортодонтического лечения до идеальной окклюзии на завершающих этапах лечения [Carvajal-Flórez et al., 2016; Weir, 2017; Borda et al., 2020]. Аналогичную цель преследуют базовые ретенционные аппараты (термопластичные каппы, позиционеры, несъемные ретейнеры и проч.) [Mauri et al., 2015; Yang et al., 2018; Кулаков, 2019; Al-Jasser et al., 2020; Макатов, 2023]. В ряде случаев более эффективным решением оказывается применение эджуайс-техники в комбинации с удалением зубов, а также различных съемных (активатор Кламмта, бионатор Baiters, LM-активатор, пропульсор Muhleman, эластопозиционер «Корректор» и проч.) и несъемных (ФНТА, аппаратов Гербста, Форсуса, Power Scope, Twin-Force Power Scope, Motion 3D, MARA и проч.) корректоров.

Также применяются аппараты для дистализации моляров верхней челюсти (аппарат Nance, аппарат Distal Jet, небная дуга Гожгариана, аппарат Pendulum, аппарат Поздняковой, аппарат Коркгауза, аппарат Энгеля и проч.) [Попов, 2019; Кузнецова и др., 2020; Lagravère et al., 2020; Li, Chung, 2022]. Данные аппараты производятся поэлементно, *аналогово-фрезерным методом*, тогда как собираются ручным способом. Аналогичным способом изготавливаются съемные и несъемные ортодонтические пластинки, предназначенные для раннего ортодонтического лечения [Арсенина, 2016; Голованич и др., 2017; Игнатьева, Хамитова, 2018; Водолацкий, Макатов, 2021; Пилипенко, Максьюков, 2021; Virji et al., 2023]. Они производятся, как правило, из полимера и проволоки (одно-, двухчелюстные, аппараты Брюкля, Френкеля, активатор Гойпля, с ретракционной дугой, рукообразным

отростком, толкателем и проч.). Процесс может осуществляться с привлечением прикладного ПО на определенных подэтапах диагностики и цифрового позиционирования коррекционной конструкции.

Применение аппаратов для дистализации моляров верхней челюсти особенно актуально в случаях ограничений применения абсолютной опоры в виде ортодонтических мини-винтов [Степанов и др., 2016; Архангельская и др., 2017; Nadadpour et al., 2019], как зубосохраняющей технологии [Степанов и др., 2022]. Как правило, они используются в дополнении к брекет-системам, например, к Ortho Metric, а также элайнерам или ортодонтическим пластинкам. Они представляют собой небольшие титановые или стальные винты диаметром от 1,5 до 2 мм, средняя длина которых составляет от 6 до 12 мм. Мини-винты состоят из внутрикостной части с самонарезающей резьбой и внекостной части, представляющей из себя головку с отверстием и бороздкой для фиксации лигатур, дуг и эластиков. Основным материалом является титановый сплав. Производство мини-винтов в настоящее время представлено в настоящее время брендами OrthoEasy (Германия), VectorTas (США), BioRay (Тайвань), Tomas (Германия), Anchor (Корея), Mini Orthodontic Implant (Италия), «Турбо», «Конмет» (Россия). Заказ индивидуальной детали осуществляется на основе цифрового протокола лечения [Ronsiville et al., 2023]. В литературе приводятся случаи установки расширителя верхней челюсти и мини-винтов с помощью хирургического шаблона, напечатанного на 3D-принтере [Graf et al., 2018; Sánchez-Riofrío et al., 2020]. Сравнительная функциональная эффективность не показательна [Aboshady, Abouelezz, 2022; Aboshady et al., 2022]; также имеются и доказательства расхождений [Степанов, Апресян, 2021; Pliska et al., 2023].

Ортодонтические мини-винты используются в клинических случаях аномалий II-III класса, для ретенции зубов, искривления окклюзионной плоскости, открытого прикуса, для целей сегментации интрузии и экструзии зубов, при необходимости выпрямления, ретракции, протракции зубов и проч.

[Попова, Арсенина, Лебеденко, 2021; Попова, Арсенина, Лебеденко и др. 2021; Антонова и др., 2023; Inchingolo et al., 2023]. Также отмечается, что использование скелетной опоры (мини-винты и якорные пластины) при коррекции мезиальной окклюзии позволяет нормализовать наклон резцов без потери опоры при тракции фронтального отдела верхней челюсти, что способствует снижению вероятности возникновения побочных эффектов [Jie et al., 2020; Lombardo et al., 2020; Попова, Арсенина, Лебеденко, 2021; Попова, Арсенина, Хворостенко, 2021; Попова и др., 2022; Vaxi et al., 2023]. В исследовании Е.А. Хворостенко предложена методика лечения пациентов с сужением и деформацией зубоальвеолярных дуг с помощью несъемных аппаратов (брекет-систем) и минивинтов [2023].

В данном контексте интерес также представляют ортодонтические аппараты с кортикальной порой FitFree; они применяются для дистализации, мезиализации премоляров и моляров, для интрузии переднего и/или экстррузии боковых сегментов челюстей, а также протрузионного наклона коронок резцов при глубоком прикусе в случаях вынужденного отказа от других ортодонтических конструкций/аппаратурно-хирургических методов [Тимченко, 2018]. FitFree представляют собой несъемные ортодонтические конструкции, изготавливаемые из металла с использованием CAD/CAM – технологий. Они фиксируются на небных винтах Орто Изи. Концепция FitFree принадлежит ГК «ПУМПА» (цифровая лаборатория полного цикла «ОРТОДЕПО»). На ее основе осуществляется 3D моделирование и изготовление индивидуальных ортодонтических аппаратов (цельная конструкция из безникелевого CoCr сплава без паяных элементов) и шаблонов (полимер) для быстрой установки на временной кортикальной основе. Так, Е. В. Кирсановой и соавт. описан цифровой протокол коррекции трансверсального дефицита верхней челюсти и восстановления координации зубных рядов у пациентов с завершенным скелетным ростом с использованием аппарата FitFree (изготовлен методом 3D печати) [Кирсанова

и др., 2021]. Песенко Е.В. доказала эффективность и комфортность ортодонтического лечения при использовании аппарата FitFree в сравнении со съёмными расширяющими пластиночными аппаратами для расширения верхней челюсти, разработала протокол лечения детей 6–12 лет с сужением верхней челюсти (метод фрезерования, Exocad) [2023].

Дистальную/мезиальную окклюзию, трему/диастему, скученность и иные зуботехнические аномалии/деформации лечат с применением эджуайс-техники (брекет-систем), в т.ч. в комбинации с удалением отдельных зубов. Их использование обеспечивает максимально эффективные результаты перемещения зубов/корней за счет приложения постоянных сил, максимальный контроль за которыми позволяют решать даже самые сложные клинические случаи [Cassetta et al., 2017; Sharma, Kunda, 2020; Черненко и др., 2023; Никитина, Громова, 2022; Mendes Ribeiro et al., 2024]. Отмечается, что соблюдение этапов лечения брекет-системой, в том числе, с применением аппаратуры функционально-направляющего действия (коронка Катца, аппарат Шварца, пластинка с окклюзионными накладками, элайнеры и проч.), способствует более быстрой нормализации окклюзионных взаимоотношений, в т.ч. для целей подготовки полости рта к рациональному протезированию [Персин и др., 2015; Дмитриенко и др., 2022].

Также имеются исследования, доказывающие эффективность применения брекет-систем при лечении пациентов с зубочелюстными аномалиями и функциональными нарушениями ВНЧС [Стяжкин, 2023]. Вместе с тем, указывается и на большое количество отрицательных сопровождающих ортодонтическое лечение с использованием эджуайс-техники факторов, в частности: потребность в тщательной гигиене полости рта (ухудшение гигиенического статуса через 3 месяца после начала лечения), наличие дискомфорта в период адаптации пациента к конструкции из-за присутствия пружин, эластиков, лигатур, а также вынужденных корректировок брекет-системы и обусловленных этим постоянных очередных

посещений врача [Best et al., 2017; White et al., 2017; Каскулова, 2020; Вахі et al., 2023]. В исследованиях также указывается, что при лечении брекет-системами происходит перегрузка тканей пародонта, возникает сдавление и тромбоз сосудов, нарушается кровообращение и питание тканей, что проявляется в воспалительной реакции [Юсупова, 2018; Дмитриенко, 2022; Luchian et al., 2024].

Брекеты представляю собой специальные замочки, фиксируемые на вестибулярной или оральной поверхности зуба с помощью специального материала, например, адгезива [Гончарик, 2024]. Металлическая дуга, располагающаяся в пазе каждого брекета, создается усилие, необходимое для исправления зубочелюстной аномалии. В настоящее время для производства брекет-систем используются различных технологии и материалы (металл и его сплавы, пластик, керамика, сапфир). Исследований, позволяющих заключить о клинко-экономической эффективности того или иного материала, найдено не было. В методической литературе, вместе с тем, отмечается, что наименее удобоносимой является брекет-система, произведенная из пластикового материала, что обусловлено впитыванием красителей, окрашиваем, а также недостаточной прочностью конструкции к механическим действиям [Токаревич и др., 2022].

В зависимости от расположения на поверхности зуба выделяются лингвальные и вестибулярные брекет-системы (Ormco, 3M Unitek, 3M Unitek, Ortho Technology, Ортолайт и проч.), по способу фиксации дуги – *лигатурные*, *безлигатурные* (самолигирующие). Особая приверженность к использованию последних (Damon Clear, SmartClip, Clarity SL и проч.) обусловлена такими факторами, как оптимальность работы врача-ортодонта, сокращение сроков лечения, физиологичность биомеханики (меньший размер брекетов на некоторых зубах, например, на верхних резцах), снижение количества осложнений при ортодонтическом лечении; кроме того, самолигирующие брекет-системы показаны пациентам с заболеваниями пародонта [Брянцева и

др., 2013; Бандура и др., 2015; Куватбаева, 2017; Mester et al., 2022]. Их конструкция предусматривает механизм удержания дуги в пазах, а следовательно, не требует применения лигатур.

Наиболее широко в настоящее время используется эджуайс-техника Insignia и Damon (Ormco, США). Ю. Хегеле и соавт. в результате компаративного исследования пришли к заключению об отсутствии каких-либо значимых различий в процессе производства и результатов лечения. Вместе с тем, смещение нижней челюсти было больше, чем смещение верхней: между двумя CAD/CAM системами имелась статистически значимая разница. При сравнении результатов лечения с виртуальными сетапами мезиальное положение было выполнено лучше всего, за ним последовали вертикальные положения. Наибольшие расхождения были выявлены при поперечном расположении. Значения угловых изменений показали наибольшее соответствие сетапу, в то время как значения наклонов показали наибольшие расхождения [Hegele et al., 2021].

Производство эджуайс-техники традиционно осуществляется аналоговым (метод литья, CLASS-техника и проч.) и фрезерным методом. Аддитивные технологии производства брекетов в настоящее время применяются не так часто, как случае элайнеров, однако, метод активно развивается. Впервые полностью напечатанные на 3D принтере брекеты в 2021 г. создала компания LightForce Orthodontics. В отличие от классических брекет-систем, которые изготавливаются серийно с использованием фрезерных технологий (например, литья под давлением), эджуайс-системы LightForce изготавливаются индивидуально для каждого зуба, согласно цифровому протоколу, что полностью исключает вероятность погрешности и дополнительных действий со стороны специалиста (например, центрация). Результаты оценки клинической эффективности ортодонтической конструкции показывают, что лечение с помощью LightForce может сократить общее время лечения и количество посещений по сравнению с обычными

брекетами [Waldman et al., 2023]. Также отмечается, что LightForce улучшает качество результата лечения. По сравнению со съёмными прозрачными каппами, брекет-системы LightForce требуют меньшего соблюдения пациентом требований и могут использоваться в широком диапазоне типов и сложности случаев зубочелюстных аномалий [Waldman, 2023]. Однако, результатов клинических исследований недостаточно для того, чтобы объективно заключить о сравнительной эффективности 3D-печати/фрезерования.

Лечение пациентов с зубочелюстными аномалиями и функциональными нарушениями ВНЧС эффективно при применении брекет-систем и окклюзионных шин (капп) [Уманская, 2014; Чхиквадзе и др., 2019; Мансур, Щербаков, 2021; Стяжкин, 2023; Зражевская и др., 2024]. При их использовании предотвращается смыкание зубов в привычной окклюзии и создается новое пространственное положение нижней челюсти с возможностью коррекции во всех трех плоскостях. Сплиты позволяют изменить межальвеолярное расстояние и соотношение челюстей, что в свою очередь способствует устранению компрессии мягкотканых образований структурами сустава, снижению нагрузки на ВНЧС и реорганизацию его элементов и восстановление оптимального тонуса жевательной мускулатуры [Велиханова, 2022; Хватова, 2023; Albagieh et al., 2023; Бородина и др., 2023]. В ходе сплит-терапии диагностируется улучшение позиции мышечковых отростков нижней челюсти и уменьшение проявления симптомов ДВНЧС вне зависимости от роста и типа лица пациента [Fernández-González et al., 2017; Дробышева, Велиханова и др., 2019; Дробышева, Мирзоев, Дробышев, 2019, Макеева и др., 2024; Будников и др., 2025]. В этом же направлении развиваются отечественные конструктивные решения для окклюзионных шин и прикусных блоков, ориентированные на фиксацию терапевтического положения нижней челюсти и профилактику функциональной перегрузки ВНЧС [Макеева и др., 2024; Апресян и др., 2025].

В описываемых в литературе случаях сравнивается эффективность окклюзионных шин, изготовленных способом полимеризации и методом фрезерования; при моделировании в шину закладывались конструктивные параметры высокой точности. Каппы изготавливали методом CAD/CAM моделирования в виртуальном артикуляторе по данным цифровой аксиографии. Результаты исследований указывают на то, что шины, созданные путем холодной полимеризации, имели меньшую эффективность гнатологического лечения (81,8%, чем сплиты, созданные с помощью субстративной технологии (88% эффективности) [Fan et al., 2016; Crout, 2017; Пономарев и др., 2018; Чхиквадзе и др., 2019]. Также указывается, что аппараты, изготовленные методом фрезерования, имеют больший срок службы, в связи с чем, среди прочего, они могут быть использованы для ортопедического восстановления зубов (временные коронки) и регистрации позиции нижней челюсти для сохранения взаиморасположения структур ВНЧС и предупреждения рецидива [Gibreel et al., 2021].

В ряде источников также критикуется *метод термоформирования* окклюзионных шин, а также других ортодонтических конструкций (брекетов, элайнеров, трейнеров), как правило, в сравнении аддитивной технологией (3D-печать) их изготовления [Palazzo et al., 2020]. Отмечается, что аддитивные технологии позволяют сэкономить время и повысить экономическую эффективность производства сплитов. Вместе с тем, указывается на необходимость подбора качественного материала для изготовления шин, поскольку большинство из используемых в настоящее время не способны к упругой деформации, поэтому они могут легко сломаться при более высоких нагрузках, например, у пациентов с бруксизмом [Prpic et al., 2023; Abad-Coronel et al., 2023; Ateş et al., 2024, Макеева и др., 2024]. Отдельного внимания заслуживает разработка светоотверждаемых композиций для аддитивного производства разобшающих прикусных накладок, поскольку свойства

материала напрямую определяют точность, прочность и клиническую воспроизводимость конструкции [Будников и др., 2025].

1.4. Визуализация планируемого лечения пациенту

В современных научных исследованиях все больше внимания уделяется проблеме интеграции цифровых методов управления в стоматологической практике, доказывая эффективность использования электронных/цифровых форм и программ при создании протоколов оказания междисциплинарной, в том числе, ортодонтической стоматологической помощи пациентам с зубочелюстными аномалиями [Felter et al., 2018; Hadadpour et al., 2019; Ведешина, 2019; Селескериди, 2020; Чхиквадзе и др., 2020; Greene, Manfredini, 2020; Rao, 2021; Басиева, 2022; Постников, 2022; Вакушина и др., 2022; Велиханова и др., 2022]. Разработка новых компьютерных/цифровых платформенных решений в области управления первичного приема позволяет среди прочего успешно создавать и архивировать ортодонтические анкеты (медицинские карты), истории болезни пациентов, проводить визуализации и презентации планов лечения и стоматологических (ортодонтических) манипуляций [Ланина, 2019; De Brito et al., 2020; Lo Giudice et al., 2020; Бассетти, 2021; Габдрафиков, 2021; Гиоева и др., 2021; Ряховский и др., 2021; Дмитриенко и др., 2022; Салеева и др., 2022]. Данная функция клинического менеджмента необходима для более эффективной диагностики, собственно лечения, *удовлетворяющего ожидания пациентов*.

В перечне бизнес-процессов, включаемых в алгоритм управления первичного приема, важное место занимает подготовка *первичной медицинской документации*, что обусловлено высоким уровнем развития ортодонтии как специальности, с одной стороны, и возросшими требованиями пациентов к качеству ортодонтического лечения. В современной клинической практике используется медицинская карта по форме № 043-1/у «Медицинская карта ортодонтического пациента» (утв. Приказом Минздрава России от 15.12.2014 № 834н), разработанная на кафедре ортодонтии МГМСУ под

руководством Л.С. Персина. Она включает в себя *анкетную, диагностическую и планировочную части*, отображает зубную формулу пациента, и состоит из следующих блоков: паспортные данные пациента (паспортная часть медицинской карты, информированное согласие / согласие на обработку персональных данных, договор об оказании платных медицинских услуг), обследование пациента (опрос – жалобы, анамнез; внешний осмотр – осмотри лица, кефалометрия и проч.; внутриротовое исследование – осмотр полости рта, осмотр зубов, зубные дуги), диагноз и план лечения [Шкарин, 2021]. Медицинская карта может быть представлена в бумажном и электронном/цифровом виде (Приказ Минздрава России от 09.01.2018 № 2н).

Электронная/цифровая версия Карты в настоящее время интегрируется в программы управления стоматологическими клиниками, представлена в большинстве аналоговых (например, Dental4Windows), 2D- (программы визуализации и планирования дизайна улыбки) и 3D программ планирования стоматологического лечения, как правило, в виде самостоятельного модуля (цифровая карта/анкета ортопедического/ортодонтического пациента) [Полилов, 2019]. Особый интерес представляют *цифровые карты/анкеты ортодонтического пациента, интегрированные в ПО цифровых ортодонтических лабораторий*. В качестве примера можно привести цифровую анкету Flexiligne – производителя ортодонтических конструкций (элайнеров) [Рыбаков, 2024]. В нее вводятся данные пациента (ФИО, дата рождения), в раздел диагностики загружаются фотографии, сделанные во время клинического осмотра согласно протоколу, производится описание текущей ситуации полости рта пациента.

Индивидуальный план заполняется согласно клиническому запросу пациента по представленному в анкете протоколу. Цифровое решение также предполагает контроль производства ортодонтической конструкции. Получение дополнительных данных и (или) проведение дополнительных действий/процедур, не предусмотренных электронной/цифровой

картой/анкетой остаются на усмотрение врача. Так, например, в рамках своего клинико-лабораторного исследования, Э.В. Басиева и соавт. проводили углубленный опрос пациентов с окклюзионной патологией, ассоциированной мышечно-суставными дисфункциями ВНЧС для заполнения медицинской карты/анкеты, производили МРТ ВНЧС и стабилOMETрию. По итогу, было заключено о необходимости введения в диагностический протокол помимо основных остеопатические методы диагностики [Апресян и др., 2025].

Индивидуальный план лечения, его основные этапы и результат должен быть представлен (визуализирован) пациенту в целях повышения их мотивации к оптимальному объему стоматологических диагностических и лечебных процедур, также оптимизации клинико-экономического эффекта лечения благодаря точности сопоставления образа будущей улыбки с результатами реального прототипирования при использовании CAD/CAM технологий [Qureshi, 2012; Zimmermann, Mehl, 2015; Vandenberghe, 2018; Cervino et al., 2019; Апресян, Степанов, 2021]. Многие современные исследования доказывают, что на лояльность и удовлетворенность пациентов стоматологическим лечением оказывает доступность объяснения состояния (статуса), а также алгоритма лечения. Отмечается, что план лечения должен быть сформулирован путем обсуждения и согласия. Не менее важно, что бы клиницист подробно объяснил, каких совместных результатов смогу достичь врач и пациент по завершении лечения, прежде чем его начать [Little et al., 2011; Al-Mobeeriek, 2012; Riley et al., 2014; Lamprecht et al., 2020; Szabó et al., 2023]. Для решения данной задачи применяется виртуальный сетап; это технология цифрового моделирования будущего изменения зубного ряда пациента, позволяющая определить цели и задач лечения с использованием различных ортодонтических конструкций и предложить наиболее современный вид ортодонтической коррекции пациенту [Zhang et al., 2023; Pouliezou, Gravia, 2024].

Виртуальный сетап предоставляет *возможности*: точного планирования этапов коррекции положения зубов, планирования хода их перемещения до конечных точек, разработки наиболее оптимальных путей перемещения зубов из существующих инвариантов, учета положения корней зубов при планировании их перемещения, установки величины шага перемещения зубов, определения числа капп в случае применения для ортодонтического лечения элайнеров [Im et al., 2014; Camardella et al., 2016; Baan et al., 2020; Sereewisai et al., 2023]. Современные исследования убедительно доказывают ценность визуализации пациенту результатов будущего стоматологического лечения [Churruca et al., 2021; Goodrich, Lazenby, 2023]. А.М. Кусаибати и колл. провели анализ динамики изменения ожиданий и удовлетворенности пациентов во время первого визита к стоматологу-ортодонт, после презентации сетапа, созданного с помощью Ortho Analyzer, для презентации результатов лечения с помощью эджуайс-технологии, и по завершении лечения. Сравнение данных анкеты позволило заключить о значительном повышении *уровня ожиданий* пациентов после визуализации плана лечения на виртуальном сетапе, и зарегистрировать общий высокий *уровень удовлетворенности* после снятия брекет-системы [Kusaibati et al., 2023].

Повышению уровня ожиданий и общей удовлетворенности лечением пациента также способствуют мотивационные презентации плана и этапов лечения с визуализацией окончательного состояния зубных рядов и изменения лицевых признаков. В общей стоматологической практике, как правило, называются такие консультационно-планировочные решения, как DentalAccord, Dentaltap, DentalSteps, «Зеленое яблоко» и проч., позволяющие иллюстрировать клиническую картину и наглядной визуализации поэтапного плана лечения стоматологического пациента. Сравнительный анализ функциональных возможностей указанных программ по доступным источникам [Апресян, Степанов и др., 2020] указывает на приоритет ПО DentalSteps; она представляет собой облачное решение, разработанное

российскими ИТ-специалистами с ориентацией на наличествующий практический опыт применения подобных программ за рубежом. Отличительными особенностями DentalSteps являются возможности: быстрого (от 15 мин.) создания подробного и визуально эстетичного этапного плана стоматологического лечения, в т.ч. на основе подгруженных результатов рентгенологических исследований; создания бесконечного множества альтернативных вариантов такого плана; участие в его создании специалистов различного профиля с регистрацией вносимых изменения; визуальное и текстовое описание, в т.ч. предлагаемых манипуляций, каждого этапа лечения; наличие библиотеки динамичных элементов, расположенных в ячейках зубной формулы, что обеспечивает удобство добавления необходимых графических схем.

После окончательного моделирования зубов и зубных рядов, пациенту может быть представлен будущий дизайн улыбки. Компьютерная визуализация дизайна улыбки помимо мотивационного эффекта, способствует более оптимальному планированию формы и размера реставраций [Garcia et al., 2018; Jafri et al., 2020; Золотарёв и др., 2022; Lepcha et al., 2022; Апресян, Степанов и др. 2020; Alharkan , 2024]. В настоящее время представлен достаточно широкий спектр аналоговых (Photoshop CS6, Microsoft PowerPoint), 2D- (Dental Smile Design, 3Shape Smile Design, Romexis Smile Design, Smilecloud, Smile Designer Pro, Aaesthetic Digital Smile Design), 3D (Digital Smile Design, Avantis 3D, 3Shape Dental System, Exocad, Prosystom) программ и приложений (iSmileStudio) визуализации дизайна улыбки. В ряде исследований, программа Digital Smile Design, произведшая революцию в своей области, по-прежнему считается «золотым стандартом» [Chisnoiu et al., 2023; Alharkan, 2024]. Вместе с тем, сравнительный анализ, проведенный Н.Н. Золотаревым, указывает на неоспоримое преимущество программы SmileCloud по таким параметрам, как время, затраченное на планирование дизайна улыбки, наличие библиотеки зубов и стоимость программы. Автор

сравнивал 2D программы Digital Smile Design (Бразилия), 3Shape (Дания), SmileCloud (США). Используя созданный с помощью решения двумерный вариант дизайна улыбки, Н.Н. Золотарев разработала методику виртуального 3D-прототипа будущей улыбки в ПО Avantis 3D. Для оценки ее эффективности проведено клинико-экономическое исследование [2023].

Для создания цифровой модели зубов используется внутриротовой сканер и специальное прикладное программное обеспечение. Программные решения для моделирования виртуального сетапа используются достаточно давно. Ранее популярными были виртуальные сетапы лингвальных брекетов, системы Insignia (Ormco, США), а также сетапы различных производителей элайнеров. Такие программы, как, например, Maestro (AGE Solutions, Италия), позволяли врачу-ортодонту создавать сетапы самостоятельно, не отходя от «кресла пациента» и использовать его для интерактивного виртуального нанесения (позиционирования) брекетов, элайнеров, зубных дуг. Maestro 3D Dental Studio в настоящее время признается на международном уровне одной из наиболее эффективных программ комплексного планирования ортодонтического лечения. Созданный с ее помощью виртуальный сетап обеспечивает визуализацию, точную симуляцию ортодонтического лечения путем сегментации отдельных зубов и их размещения, позволяя произвести выбор наилучшего способа лечения зубочелюстной аномалии путем применения оптимизации и улучшения топологии набора ортодонтических конструкций [Rafiei et al., 2022; Рыбаков, 2024].

В настоящее время клиницисты также отдают предпочтение решениям с искусственным интеллектом, таким как Autolign (Diorco, Корея), Outcome Simulator Pro (Align Technology, Аризона, США) и Ortho Simulation (Medit, Сеул, Корея). Данные решения позволяют полностью или частично автоматизировать сегментацию зубов и выравнивание зубного ряда. У. Хеин и соавт. данные программы сравнивали с моделью ручной настройки сетапа с использованием программного обеспечения Maestro 3D Dental Studio (AGE

Solutions Srl, Понтедера, Италия). Авторы доказали их практическую эффективность в сравнении с аналоговой программой, признав наиболее точной Autolign, как полуавтоматическое ПО для моделирования виртуального сетапа [Woo et al., 2023], что является компромиссом между доказательной эффективностью аналоговых и преемственностью цифровых решений в стоматологической практике [Im et al., 2014; Barreto et al., 2016; Sereewisai et la., 2023].

К полуавтоматическим решениям также можно отнести программы, функционал которых позволяет создавать 3D-сцену стоматологического лечения (Dolphin Imagine, Ortho 3D, OnyxCeph, 3Shape Ortho System, Ez3D-I и проч.). Помимо рассмотренных ранее, особый интерес вызывает новый инструмент программы Ez3D-I (Vatech, США); с помощью модуля «Ortho» выполняется моделирование процесса перемещения зубочелюстной системы при интеграции данных 3D реконструкции и 3D сегментации зубов и твердых тканей пародонта, прогнозируется состояние мягких тканей пародонта, например, после ортогнатической операции в целях удлинения нижней челюсти для нормализации прикуса и устранения диспропорции лица; с помощью модуля «Segment» производится автоматическая сегментация зубов, визуализируется сценарий удаления зубов при планировании ортодонтического или ортопедического лечения [Макаров, 2023]. Сравнительных исследований обнаружено не было.

Интерес представляют другие программы для визуализации Ez3D-I, xPlain, Dental Navigator (приложение для смартфонов), Dental Patient Education, Dentistry ProConsult. Однако, большинство из них носят исключительно информационно-образовательный характер. Контекстуально интерес также представляют приложения для ортодонтических пациентов: Brush DJ, позволяющее улучшить уровень гигиены пациента, проходящего ортодонтическое лечение; Brace Mate, информирующее о возможностях поддержания гигиены полости рта, помогающее выбирать цвет эластиков,

подсказывающее решения на экстренный случай; Myobrace, консультирующее пациентов по техникам коррекции неправильного дыхания, положения языка, нарушения глотания, дисфункции губ и щек, неправильной осанки и проч. [Апресян, Степанов, Антоник, 2020].

Однако, практика показывает, что специалисты цифровых стоматологических клиник, как правило, отдают приоритет комплексным (междисциплинарным) программам стоматологического лечения. Создание трехмерной сцены в них производится на базе фотографий пациента (согласно определенному протоколу), КТ/МРТ/КЛКТ, результатов интраорального сканирования (оптический оттиск), сканов лица, аксиографии, виртуального артикулятора и проч. с хорошо визуализируемыми антропометрическими ориентирами. Результат моделирования производится с использованием специального модуля, имеющегося в большинстве программ 3D- и комплексного планирования стоматологического лечения. Их приоритетное применение обусловлено междисциплинарностью, обеспечиваемой возможностями планирования единовременно ортодонтического, ортопедического и проч. лечения стоматологических пациентов.

Интересное решение было предложено Л. Лв. и соавт.; оно направлено на решение проблемы создания 3D-дизайна улыбки с позиции трех направлений лечения. На данный момент единственной программой, способной решить данную задачу комплексно является Avantis 3D. Авторы разработали 3D-ПО Geomagic Studio в виде универсальной платформы для создания 3D-профиля пациента, иллюстрации результата комплексного стоматологического лечения (включая визуализацию изменения лицевых признаков), а также коммуникации пациента с врачом. Апробация ПО производилась при использовании решений ортопедического, ортодонтического и ортогнатического лечения с применением 3Shape Dental System, 3Shape Ortho Analyzer и Proplan CMF 3.0 (Materialise) соответственно, в то время как

Geomagic Studio использовалась для импорта дизайна в модуль «Виртуальный пациент» [Lv et al., 2022].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ отечественной и зарубежной литературы подтвердил, что вопросы диагностики и планирования ортодонтического лечения пациентов с аномалиями зубочелюстной системы по-прежнему остаются актуальными и требуют дальнейшего развития диагностических и лечебных подходов. Рост распространённости зубочелюстных нарушений у пациентов разных возрастных категорий, повышение требований к эстетике и функциональности результатов лечения, а также стремление к достижению долговременной стабильности полученного эффекта обуславливают активное внедрение цифровых технологий в современную ортодонтическую практику.

В ходе анализа установлено, что традиционные методы диагностики, включающие применение гипсовых моделей, ручной цефалометрический анализ, антропометрические измерения и стандартные рентгенологические исследования, имеют ряд существенных ограничений. К их числу относятся высокая трудоёмкость диагностического процесса, зависимость точности результатов от опыта специалиста, риск субъективных ошибок и недостаточная воспроизводимость полученных данных. Наиболее заметно эти недостатки проявляются при обследовании взрослых пациентов со сложными клиническими случаями, сопровождающимися комбинированными зубочелюстными деформациями, частичной вторичной адентией, заболеваниями тканей пародонта и признаками дисфункции височно-нижнечелюстного сустава.

Анализ литературы показал, что развитие цифровых технологий существенно изменило подходы к диагностике и планированию ортодонтического лечения. Внутриротовое сканирование, цифровая фотометрия, телерентгенография с компьютерной обработкой изображений, конусно-лучевая компьютерная томография, CAD/CAM-технологии и методы

аддитивного производства позволяют повысить точность диагностики, оптимизировать процесс планирования лечения и обеспечить более предсказуемый клинический результат. Современные цифровые методы обеспечивают возможность комплексной оценки морфологических, функциональных и эстетических параметров зубочелюстно-лицевой системы с последующим объединением полученных данных в единую цифровую модель пациента.

Установлено, что цифровой анализ портретных фотографий позволяет более объективно оценивать симметрию лица, параметры улыбки, положение мягких тканей и эстетические характеристики лица по сравнению с традиционными антропометрическими методами. Использование специализированных программ и трехмерных технологий значительно расширяет возможности фотометрической диагностики и позволяет точнее оценивать параметры лица при планировании ортодонтического лечения.

Установлено, что цифровой анализ внутриротовых оптических слепков отличается высокой точностью и хорошей воспроизводимостью результатов. Применение цифровых моделей зубных рядов упрощает диагностический этап, сокращает время обследования и снижает вероятность ошибок, связанных с деформацией слепочных материалов или гипсовых моделей. Дополнительным преимуществом является возможность объединения всех полученных данных в единую цифровую систему диагностики и лечения. По данным современных исследований, внутриротовое сканирование обладает высокой информативностью при проведении биометрического анализа и виртуального моделирования зубных рядов, поэтому сегодня оно рассматривается как один из важных инструментов цифровой ортодонтии.

Анализ научных данных также подтвердил высокую диагностическую значимость цифровой цефалометрической обработки телерентгенограмм в прямой и боковой проекциях.

Использование компьютерных технологий при анализе ТРГ способствует более точному определению цефалометрических ориентиров, снижает влияние человеческого фактора и обеспечивает стабильность и воспроизводимость результатов по сравнению с традиционным ручным трассированием. Наиболее перспективными направлениями считаются методы трёхмерной цефалометрии и автоматизированные системы анализа изображений, основанные на применении алгоритмов искусственного интеллекта.

Установлено, что внедрение конусно-лучевой компьютерной томографии значительно расширяет возможности ортодонтической диагностики и позволяет получить более полное представление о состоянии зубочелюстной системы.

Использование КЛКТ позволяет оценивать пространственное положение зубов, состояние костной ткани, параметры дыхательных путей, структуру височно-нижнечелюстного сустава и анатомические особенности зубочелюстной системы, что значительно повышает точность диагностики и качество планирования ортодонтического лечения.

Проведенный анализ показал перспективность применения цифровых технологий при разработке современных методов лечения дистальной окклюзии. Использование позиционирующих окклюзионных накладок, изготовленных с применением CAD/CAM-систем и технологий 3D-печати, позволяет повысить точность позиционирования нижней челюсти, улучшить функциональное состояние зубочелюстной системы и обеспечить более стабильные результаты лечения. Дополнительные возможности открывает разработка специализированных конструкционных материалов для аддитивного производства ортодонтических конструкций.

Анализ современных публикаций свидетельствует о высокой эффективности цифрового моделирования позиционирующих окклюзионных накладок в терапевтическом положении нижней челюсти. Применение

виртуального моделирования обеспечивает возможность предварительной оценки окклюзионных взаимоотношений, функционального состояния ВНЧС и прогнозирования результатов ортодонтического лечения еще до начала активного вмешательства.

Особое значение в настоящее время приобретает разработка интегрированных программных решений для комплексной цифровой диагностики стоматологического пациента. Современные тенденции развития цифровой стоматологии направлены на создание единых программных платформ, объединяющих результаты фотометрии, внутриротового сканирования, цефалометрического анализа, КЛКТ и функциональных методов исследования с возможностью автоматического формирования медицинской документации и виртуального планирования лечения.

Таким образом, результаты проведенного анализа литературы свидетельствуют о высокой перспективности комплексного цифрового планирования ортодонтического лечения. Интеграция современных цифровых методов диагностики, анализа и моделирования позволяет повысить диагностическую точность, воспроизводимость результатов, временную эффективность и качество ортодонтической помощи пациентам с различными аномалиями зубочелюстной системы.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Представленная работа носит последовательный многоэтапный характер и включает как аналитическую, так и клиническую часть, направленную на оценку возможностей современных цифровых технологий в диагностике и планировании ортодонтического лечения.

Исследование проводилось по нескольким взаимосвязанным направлениям.

На первом этапе была выполнена оценка современных подходов к диагностике зубочелюстных аномалий и возможностей их интеграции в цифровую среду.

Второй этап работы посвящен разработке и апробации цифровых диагностических модулей, включающих фотометрический анализ лица, биометрическое исследование виртуальных моделей зубных рядов, цифровую цефалометрию и анализ данных компьютерной томографии. Отдельное внимание уделялось вопросам трехмерного моделирования ортодонтических конструкций, а также разработке метода цифрового планирования позиционирующих окклюзионных накладок в терапевтическом положении нижней челюсти.

На третьем этапе по результатам проведенных исследований – разработки отдельных диагностических инструментов, разработана единая программа ЭВМ, позволяющая объединить различные этапы диагностики и планирования лечения.

Далее выполнялась оценка точности, воспроизводимости и временной эффективности разработанных цифровых методов, а также их сравнительный анализ с традиционными подходами, применяемыми в ортодонтической практике.

Клиническая часть исследования включала анализ диагностических данных пациентов с различными аномалиями зубочелюстной системы, проведение цифровых и аналоговых измерений, оценку полученных результатов и определение клинической эффективности предложенных методов. Все исследования проводились с соблюдением единых диагностических протоколов и последовательной регистрацией полученных данных.

Первым этапом настоящей работы стало проведение анализа отечественных и зарубежных научных источников, посвящённых современным методам диагностики зубочелюстных аномалий, цифровым технологиям в ортодонтии и возможностям их применения при планировании лечения. Полученные данные легли в основу формирования общей концепции исследования, определения структуры цифровых диагностических модулей и выбора дальнейших направлений практической работы.

2.1. Материалы и методы анализа научных информационных источников

Первым этапом настоящего исследования стало проведение систематизированного анализа отечественных и зарубежных научных публикаций, посвящённых современным подходам к диагностике зубочелюстных аномалий, цифровым технологиям в ортодонтии и возможностям их применения при комплексном планировании лечения.

Необходимость выполнения данного этапа была связана с тем, что в современной ортодонтической практике одновременно используются как традиционные аналоговые методы диагностики, так и различные цифровые технологии, однако единый интегрированный протокол комплексного цифрового обследования пациента до настоящего времени окончательно не сформирован. Кроме того, многие существующие цифровые решения ориентированы на выполнение отдельных диагностических задач и не

обеспечивают полноценного объединения данных клинического, рентгенологического, фотометрического и биометрического обследования в единую цифровую систему.

Поиск научных источников проводился в международных и отечественных электронных базах данных PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar, eLIBRARY, CyberLeninka, а также в патентной базе Федерального института промышленной собственности (ФИПС). Дополнительно изучались диссертационные исследования, монографии, методические пособия, клинические рекомендации и публикации, посвящённые цифровым технологиям в стоматологии и ортодонтии.

Глубина поиска составила 15 лет — с 2010 по 2025 гг. В ряде случаев в анализ включались более ранние публикации, если они имели фундаментальное значение для понимания принципов ортодонтической диагностики или являлись основой современных методов цифрового анализа.

Поиск выполнялся с использованием русскоязычных и англоязычных ключевых слов и их комбинаций: «ортодонтическая диагностика», «цифровая ортодонтия», «цифровое планирование ортодонтического лечения», «фотометрический анализ лица», «фотограмметрия лица», «эстетический анализ улыбки», «внутриротовое сканирование», «цифровые модели зубных рядов», «биометрия зубных дуг», «цифровая цефалометрия», «3D-цефалометрия», «КЛКТ в ортодонтии», «кортикальная опора», «толщина альвеолярной кости», «височно-нижнечелюстной сустав», «положение суставной головки», «CAD/CAM в ортодонтии», «3D-моделирование ортодонтических конструкций»; “digital orthodontics”, “digital orthodontic treatment planning”, “facial photogrammetry”, “facial analysis”, “smile aesthetics”, “digital dental models”, “intraoral scanning”, “digital cephalometry”, “3D cephalometric analysis”, “cone beam computed tomography in orthodontics”, “alveolar bone thickness”, “cortical bone support”, “temporomandibular joint CBCT”, “condylar position”, “digital orthodontic workflow”.

Критериями включения публикаций в аналитический обзор являлись:

- соответствие теме диссертационного исследования;
- наличие данных о диагностической эффективности метода;
- применение цифровых технологий в ортодонтической практике;
- наличие сравнительной оценки цифровых и традиционных методов диагностики;
- наличие клинической или инструментальной оценки результатов;
- публикация на русском или английском языке;
- наличие полнотекстового доступа либо информативной аннотации.

Критериями невключения являлись:

- публикации, не относящиеся к ортодонтической диагностике;
- работы исключительно технического характера без клинической интерпретации;
- единичные клинические наблюдения без статистической обработки;
- дублирующиеся публикации;
- материалы рекламного характера;
- исследования с недостаточно описанной методикой.

На первоначальном этапе поиска было выявлено 512 публикаций. После удаления повторяющихся источников осталось 438 работ. На этапе анализа названий и аннотаций исключены 214 публикаций, не соответствующих цели исследования. Полнотекстовый анализ проведён для 224 научных работ. После применения критериев включения и невключения в окончательный аналитический обзор вошли 126 источников, среди которых 84 зарубежные и 42 отечественные публикации. Кроме того, были изучены 11 патентов, посвящённых цифровым методам диагностики, трёхмерному моделированию и цифровому планированию стоматологического лечения.

Проведённый анализ показал, что наиболее перспективными направлениями цифровой интеграции в ортодонтической диагностике являются: фотометрический анализ лица, биометрическое исследование

виртуальных моделей зубных рядов, цифровая цефалометрия, анализ данных конусно-лучевой компьютерной томографии.

Выбор именно этих направлений был обусловлен их высокой клинической значимостью, регулярным применением в ортодонтической практике и возможностью стандартизации диагностического процесса при использовании цифровых технологий.

Фотометрический анализ лица

Анализ публикаций показал, что оценка мягкотканного профиля лица и эстетики улыбки является обязательной частью ортодонтического обследования. В современных условиях пациенты всё чаще оценивают результат лечения не только по окклюзионным параметрам, но и по изменениям внешнего вида лица, положению губ, симметрии и эстетике улыбки.

При традиционном подходе анализ лица в значительной степени зависит от субъективной оценки врача. Использование цифровой фотометрии позволяет перевести визуальную оценку в систему объективных линейных и угловых измерений, а также повысить воспроизводимость результатов.

Работы Кузьменко Е. В. и соавт. показали, что применение фотостата и стандартизированного положения головы пациента позволяет повысить точность фотограмметрического анализа в ортодонтии.

В исследованиях Parveen et al. и Talaat et al. отмечено, что цифровая фотограмметрия может использоваться как надёжный дополнительный метод оценки мягкотканых параметров лица и эффективности ортодонтического лечения. Дополнительное значение имели исследования, посвящённые сопоставлению трёхмерных изображений лица с данными компьютерной томографии. Подобный подход позволяет объединять анализ мягких тканей и костных структур в рамках единого цифрового протокола.

Таким образом, фотометрический анализ был определён как один из основных компонентов комплексной цифровой диагностики ортодонтического пациента.

Биометрическое исследование виртуальных моделей зубных рядов

Проведённый анализ литературы показал, что биометрическое исследование зубных рядов остаётся одним из базовых этапов ортодонтической диагностики. Определение размеров зубов, формы зубных дуг, дефицита места и межзубных соотношений является основой планирования ортодонтического лечения.

Традиционные методы измерения гипсовых моделей обладают рядом недостатков: требуют физического хранения моделей, значительных временных затрат и зависят от точности ручных измерений. Развитие внутриротового сканирования позволило перейти к использованию цифровых моделей зубных рядов, пригодных для проведения высокоточных измерений.

В исследованиях Aragón et al. показано, что измерения на цифровых моделях, полученных при внутриротовом сканировании, сопоставимы по точности с измерениями на традиционных гипсовых моделях. Аналогичные результаты представлены в работах Zhang et al. и Camardella et al., где была подтверждена высокая воспроизводимость цифровых измерений.

В отечественных исследованиях Бородиной И. Д. и соавт. проведена сравнительная оценка точности современных интраоральных 3D-сканеров, подтвердившая возможность их использования для полноценной диагностики зубочелюстных аномалий.

Работы Катбех И. и соавт. продемонстрировали возможность оптимизации измерений зубных рядов в ортодонтической практике при использовании цифровых методов анализа.

Кроме того, значительный интерес представляли исследования, посвящённые цифровым подходам к диагностике аномалий формы зубных дуг и применению CAD/CAM-технологий в ортодонтии.

Полученные результаты показали, что цифровая биометрия может использоваться как один из ключевых этапов комплексного цифрового планирования ортодонтического лечения.

Цифровая цефалометрия

Анализ литературы показал, что цефалометрическое исследование остается одним из основных методов оценки скелетных и зубоальвеолярных взаимоотношений в ортодонтии.

При ручном трассировании телерентгенограмм нередко возникают сложности, связанные с большой трудоемкостью исследования, зависимостью результатов от опыта врача и различиями в интерпретации анатомических ориентиров. По этой причине в последние годы всё шире используются цифровые методы цефалометрического анализа.

В исследованиях Narkhede et al. было показано, что цифровая цефалометрия позволяет получать более воспроизводимые результаты и уменьшает количество ошибок, возникающих при ручной разметке анатомических точек.

По данным Мотоусовой С.А. и соавторов, цифровые методы оценки цефалометрических параметров отличаются большей стабильностью результатов по сравнению с традиционным ручным анализом.

Дополнительный интерес представляли исследования, посвящённые трёхмерной цефалометрии, поскольку пространственный анализ краниофациального комплекса позволяет более точно оценивать асимметрии, положение челюстей и взаиморасположение костных структур.

Исследования Li et al. и Subramanian et al. подтвердили перспективность автоматизированного определения цефалометрических ориентиров и дальнейшего развития интеллектуальных алгоритмов цифрового анализа.

На основании результатов литературного анализа цифровая цефалометрия была включена в структуру комплексной системы цифрового планирования ортодонтического лечения.

Анализ данных конусно-лучевой компьютерной томографии

Проведённый анализ литературы показал, что конусно-лучевая компьютерная томография значительно расширяет возможности современной ортодонтической диагностики за счёт получения трёхмерного изображения зубочелюстной системы.

В работах Karila et al. и Вахнея С.Н. подчёркивается, что КЛКТ позволяет проводить оценку положения зубов, объёма костной ткани, особенностей строения альвеолярного отростка, расположения ретинированных зубов, состояния кортикальной пластинки и височно-нижнечелюстного сустава.

Отдельное внимание при анализе литературы уделялось состоянию височно-нижнечелюстного сустава. Было установлено, что перед началом ортодонтического лечения необходимо учитывать положение головки нижней челюсти в суставной ямке, размеры суставных пространств и наличие структурных изменений ВНЧС.

Это имеет особое значение у пациентов с дистальной окклюзией, асимметрией лица и признаками мышечно-суставной дисфункции, поскольку в процессе ортодонтического лечения изменение положения нижней челюсти может сопровождаться изменением суставных взаимоотношений.

Отдельное внимание уделяли толщине кортикальной кости в области альвеолярного отростка верхней челюсти и альвеолярной части нижней челюсти. Современные исследования показывают, что именно состояние кортикальной пластинки во многом определяет допустимые пределы перемещения зубов при ортодонтическом лечении. При недостаточной толщине костной ткани возрастает риск появления дегисценций, фенестраций и рецессии десны после лечения.

В исследованиях Sendyk et al., Srebrzyńska-Witek et al. и Zhang et al. была подтверждена необходимость предварительной оценки костных ограничений по данным КЛКТ перед началом активного ортодонтического лечения.

Дополнительное значение имели исследования, посвящённые оценке результатов лечения пациентов с сагиттальными аномалиями окклюзии по данным КЛКТ.

Таким образом, КЛКТ была определена как обязательный диагностический компонент комплексного цифрового планирования ортодонтического лечения, позволяющий оценивать не только положение зубов и челюстей, но и состояние костной ткани и височно-нижнечелюстного сустава.

Основные информационные источники, подтверждающие диагностическую эффективность выявленных методов представлены в таблице 1.

Диагностическое направление	Авторы	Основные выводы исследований	Значение для настоящего исследования
Фотометрический анализ	Беляева В.Ю. и соавт., 2017	Подтверждена высокая информативность фотометрического анализа при ортодонтическом обследовании	Обоснование применения цифровой оценки параметров лица
	Кузьменко Е.В. и соавт., 2020	Использование стандартизированного фотопротокола повышает точность и воспроизводимость измерений	Формирование основы фотометрического модуля
	Parveen et al., 2024	Цифровая фотограмметрия позволяет объективно анализировать мягкие ткани лица	Подтверждение эффективности цифровой диагностики
	Talaat et al., 2021	Цифровые фотографии обладают высокой диагностической ценностью при	Обоснование применения цифровой визуализации

Диагностическое направление	Авторы	Основные выводы исследований	Значение для настоящего исследования
		ортодонтическом обследовании	
	Апресян С.В. и соавт., 2023	Совмещение 3D-модели лица и данных КТ расширяет возможности планирования лечения	Интеграция анализа мягких тканей и костных структур
Цифровая биометрия	Дмитриенко С.В. и соавт., 2022	Систематизированы современные методы биометрического анализа зубных дуг	Теоретическая база цифровой биометрии
	Бородина И.Д. и соавт., 2022	Современные внутриротовые сканеры обеспечивают высокую точность цифровых моделей	Подтверждение достоверности цифровых моделей
	Катбех И. и соавт., 2019	Цифровые технологии позволяют оптимизировать измерения зубных рядов	Повышение точности и воспроизводимости анализа
	Aragón et al., 2016	Результаты измерений на цифровых моделях сопоставимы с гипсовыми моделями	Обоснование перехода к цифровым моделям
	Camardella et al., 2017	Подтверждена высокая точность цифровых моделей зубных рядов	Подтверждение эффективности внутриротового сканирования
	Zhang et al., 2016	Цифровые модели пригодны для полноценного ортодонтического анализа	Доказательство клинической эффективности метода
	Аюпова И.О. и соавт., 2023	Цифровая цефалометрия повышает точность	Основа цифровой цефалометрической обработки

Диагностическое направление	Авторы	Основные выводы исследований	Значение для настоящего исследования
		анализа телерентгенограмм	
	Мотоусова С.А. и соавт., 2020	Использование цифровых измерений уменьшает вариабельность результатов	Повышение воспроизводимости исследований
	Григоренко М.П. и соавт., 2022	Трёхмерная цефалометрия расширяет возможности оценки краниофациального комплекса	Пространственный анализ анатомических структур
	Narkhede et al., 2024	Цифровая цефалометрия снижает количество ошибок ручной разметки	Подтверждение диагностической надёжности
	Li et al., 2020	Автоматическое определение ориентиров ускоряет выполнение анализа	Перспективы автоматизации диагностики
	Subramanian et al., 2022	Цифровые алгоритмы обеспечивают более стабильные результаты измерений	Обоснование интеллектуальных методов анализа
КЛКТ-анализ	Алимова М.Я., Ерохин А.И., 2010	Применение КЛКТ позволяет корректировать ортодонтический план лечения	Обоснование необходимости трёхмерной диагностики
	Ленденгольц Ж.А. и соавт., 2010	Подтверждена высокая информативность КЛКТ в ортодонтии	Формирование КЛКТ-модуля исследования
	Kapila et al., 2014	КЛКТ существенно расширяет диагностические	Международное подтверждение

Диагностическое направление	Авторы	Основные выводы исследований	Значение для настоящего исследования
		возможности при патологии зубочелюстной системы	эффективности метода
	Вахней С.Н., 2019	Трёхмерная томография повышает информативность диагностики	Обоснование пространственного анализа
	Лосев Ф.Ф. и соавт., 2022	КЛКТ позволяет объективно оценивать результаты лечения пациентов с сагиттальными аномалиями	Контроль эффективности ортодонтического лечения
КЛКТ-анализ ВНЧС	Фадеев Р.А. и соавт., 2021	КЛКТ позволяет оценивать положение суставной головки нижней челюсти	Анализ состояния ВНЧС
	Paknahad et al., 2015	Положение мышечного отростка имеет важное значение при ортодонтическом лечении	Обоснование оценки суставных взаимоотношений
	Park et al., 2015	Морфология суставной головки влияет на функциональное состояние ВНЧС	Анализ функционального состояния сустава
КЛКТ-анализ костной ткани	Кирсанова Е.В. и соавт., 2021	Кортикальная опора определяет границы безопасного перемещения зубов	Анализ костных ограничений при лечении
	Ищенко Е.А., Попов Н.В., 2022	По данным КЛКТ возможна оценка параметров апикального базиса	Пространственная оценка костной ткани

Диагностическое направление	Авторы	Основные выводы исследований	Значение для настоящего исследования
	Sendyk et al., 2019	Ортодонтическое лечение влияет на толщину альвеолярной кости	Оценка риска формирования дегисценций
	Srebrzyńska-Witek et al., 2017	Морфология кортикальной кости имеет существенное клиническое значение	Обоснование оценки кортикальной пластинки
	Zhang et al., 2023	При отдельных видах аномалий корня зубов могут выходить за пределы альвеолярной кости	Индивидуализация ортодонтического планирования

Таким образом, проведённый анализ отечественных и зарубежных научных источников позволил определить основные направления ортодонтической диагностики, в которых применение цифровых технологий является наиболее обоснованным с клинической и методологической точки зрения. К таким направлениям были отнесены фотометрический анализ лица, биометрическое исследование виртуальных моделей зубных рядов, цифровая цефалометрия и анализ данных конусно-лучевой компьютерной томографии.

Выбор указанных диагностических блоков был обусловлен тем, что каждый из них отражает отдельный уровень оценки зубочелюстно-лицевой системы. Фотометрический анализ позволяет объективизировать изучение мягкотканного профиля лица, симметрии, эстетики улыбки и внешних проявлений зубочелюстных аномалий. Биометрический анализ виртуальных моделей зубных рядов позволяет оценивать размеры зубов, форму и длину зубных дуг, наличие дефицита места и межзубные соотношения без постоянного использования гипсовых моделей. Цифровая цефалометрия дает возможность количественно оценивать скелетные, зубоальвеолярные и мягкотканые параметры. Использование КЛКТ дополняет диагностику трехмерной оценкой костных структур, положения зубов, состояния ВНЧС,

положения головок нижней челюсти, а также толщины кортикальной кости верхней и нижней челюстей.

Анализ литературных данных показал, что традиционные методы диагностики по-прежнему имеют высокую клиническую ценность, однако сопровождаются рядом недостатков. Среди них — зависимость результатов от опыта специалиста, трудоемкость измерений, сложности при хранении и повторной обработке данных, а также вероятность различий между исследователями при проведении анализа.

Цифровые методы, напротив, создают условия для стандартизации диагностического процесса, повышения воспроизводимости измерений, сокращения времени обработки данных и более наглядного представления полученных результатов.

При этом сам факт наличия цифрового инструмента не может рассматриваться как достаточное основание для его безусловного внедрения в клинический протокол. Каждый диагностический модуль требует отдельной проверки точности, воспроизводимости и клинической информативности в сравнении с традиционными методами, применяемыми в ортодонтической практике. Именно поэтому дальнейшие этапы исследования были направлены на последовательную оценку диагностической эффективности выбранных цифровых направлений.

Полученные на аналитическом этапе данные послужили основанием для формирования последующего дизайна исследования, в котором каждый из выбранных диагностических блоков рассматривался как самостоятельный объект научной оценки. Такой подход позволил перейти от теоретического обоснования цифровизации ортодонтической диагностики к практической проверке её возможностей на клиническом материале.

2.2 Материал и метод разработки цифрового способа фотометрического анализа

Второй этап исследования был направлен на разработку цифрового способа фотометрического анализа портретных фотографий пациента и последующую оценку его диагностической эффективности в сравнении с традиционными антропометрическими методами. Необходимость выделения данного этапа была связана с тем, что фотометрическая оценка лица занимает важное место в ортодонтической диагностике, однако при ручном выполнении во многом зависит от качества фотографии, правильности ориентации головы пациента, точности нанесения антропометрических точек и опыта исследователя.

Разработка цифрового способа фотометрического анализа проводилась в два последовательных этапа. На первом этапе формировалась структура самого цифрового метода: определялись виды фотографий, перечень антропометрических ориентиров, линейные и угловые параметры, алгоритм расчётов и порядок формирования заключения. На втором этапе проводилась оценка диагностической эффективности разработанного способа путём сравнения полученных результатов с традиционными ручными антропометрическими измерениями.

2.2.1. Материал для разработки цифрового способа фотометрического анализа

Материалом для разработки цифрового способа служили портретные и внутриротовые фотографии пациентов, полученные по стандартному ортодонтическому фотопротоколу. В разработанный фотометрический протокол были включены следующие изображения: лицо анфас без улыбки, лицо анфас с улыбкой, лицо анфас с ретракторами, профиль справа, профиль слева, профиль с улыбкой справа, профиль с улыбкой слева, а также внутриротовые фотографии зубных рядов в положении сомкнутых зубов, с

приоткрытым ртом, в боковых проекциях, под углом 45° и окклюзионные фотографии верхнего и нижнего зубных рядов.

Основной задачей при разработке метода являлось создание цифрового инструмента, позволяющего загружать изображение пациента, наносить на него антропометрические точки, выполнять линейные и угловые измерения, рассчитывать соотношения между отдельными параметрами лица и формировать заключение по результатам анализа.

Техническая реализация цифрового способа предусматривала возможность загрузки изображений в форматах PNG и JPG, работу с изображениями из локального хранилища или базы данных, отображение фотографии в интерфейсе программы, адаптацию изображения под различные соотношения сторон, расстановку, перемещение и удаление антропометрических точек, автоматический расчёт расстояний и углов, визуализацию линий, плоскостей и измеренных параметров, а также сохранение данных и экспорт отчёта.

В качестве программной среды для реализации цифрового способа была выбрана Unreal Engine 5.4 с использованием C++ и/или Blueprints. Такая среда была выбрана в связи с возможностью построения интерактивного пользовательского интерфейса, работы с изображениями, визуализации линий и точек, а также последующего расширения функционала за счёт других диагностических модулей.

2.2.2. Методика разработки цифрового фотометрического анализа

Разработка цифрового способа фотометрического анализа проводилась поэтапно.

На первом этапе был сформирован пользовательский интерфейс, позволяющий врачу загружать портретные и внутриротовые фотографии пациента. При загрузке изображения предусматривалась его адаптация к рабочему полю, сохранение исходных пропорций и возможность дальнейшего нанесения антропометрических ориентиров (рисунок 1).

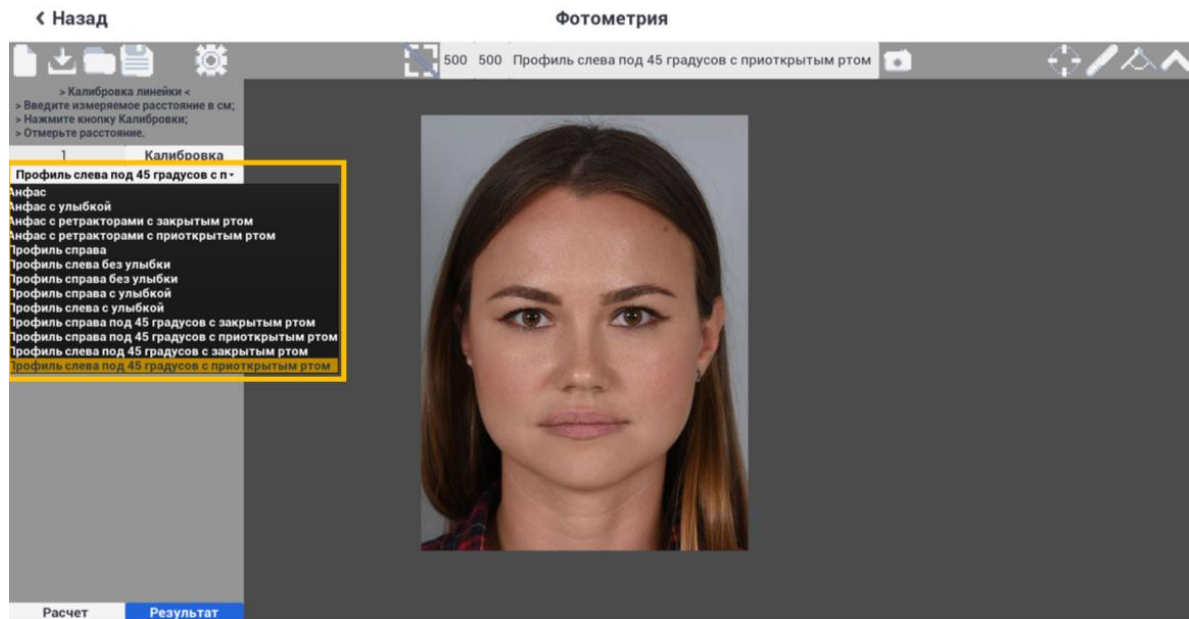


Рисунок 1 – Интерфейс программы модуль «Фотометрия» с загруженным фото в фас пациента

На втором этапе была разработана система расстановки антропометрических точек. Пользователь получал возможность наносить точки на изображение, изменять их положение, удалять ошибочно установленные точки и выбирать тип точки в зависимости от анализируемой фотографии. Для удобства восприятия каждая точка имела обозначение и нумерацию.

Для фотографии лица анфас без улыбки были предусмотрены следующие основные антропометрические ориентиры: eu — наиболее латерально выступающие точки головы справа и слева; zu — наиболее выступающие кнаружи точки скуловых дуг; go — точки в области углов нижней челюсти; orh — точка на пересечении средней линии лица и касательной к надбровным дугам; sn — точка перехода перегородки носа в верхнюю губу; gn — нижняя срединная точка подбородка.

По данным точкам рассчитывались ширина головы, морфологическая ширина лица, гониальная ширина лица, полная морфологическая высота лица, средняя морфологическая высота лица и нижняя морфологическая высота лица. На основании этих измерений определялись форма головы, форма лица

по индексу Изара, соотношение средней и нижней трети лица, а также наличие выраженной асимметрии правой и левой половины лица .

Для фотографии анфас с улыбкой методика предусматривала определение совпадения средней линии лица со средней линией верхнего и нижнего зубных рядов, оценку наклона окклюзионной плоскости относительно зрачковой линии, а также визуальную и метрическую оценку ширины улыбки, арки улыбки и симметричности улыбки.

На фотографии анфас с ретракторами проводилась оценка окклюзионной плоскости относительно зрачковой линии, а также анализ положения средних линий верхнего и нижнего зубных рядов. На фотографии с приоткрытым ртом дополнительно оценивалась экспозиция резцов и характер смещения нижней челюсти при открывании рта.

Для профильных фотографий справа и слева были определены точки n , sn и rg , необходимые для оценки типа профиля лица. Угол профиля рассчитывался по взаимному расположению указанных точек. При значении менее 165° профиль расценивался как выпуклый, при значении около 170° — как прямой, при значении более 175° — как вогнутый.

Дополнительно в профильной проекции оценивалось положение губ относительно эстетической линии Риккетса, проходящей через кончик носа и наиболее выступающую точку подбородка. В норме верхняя губа располагается позади Е-линии приблизительно на 2 мм, нижняя губа касается линии или находится позади неё примерно на 1 мм. Также рассчитывался носогубный угол по точкам sn , ls и $coll$. Нормальным принималось значение около $105 \pm 5^\circ$. Увеличение угла рассматривалось как признак ретрузионного положения верхней губы, уменьшение — как признак её протрузии (рисунок 2).

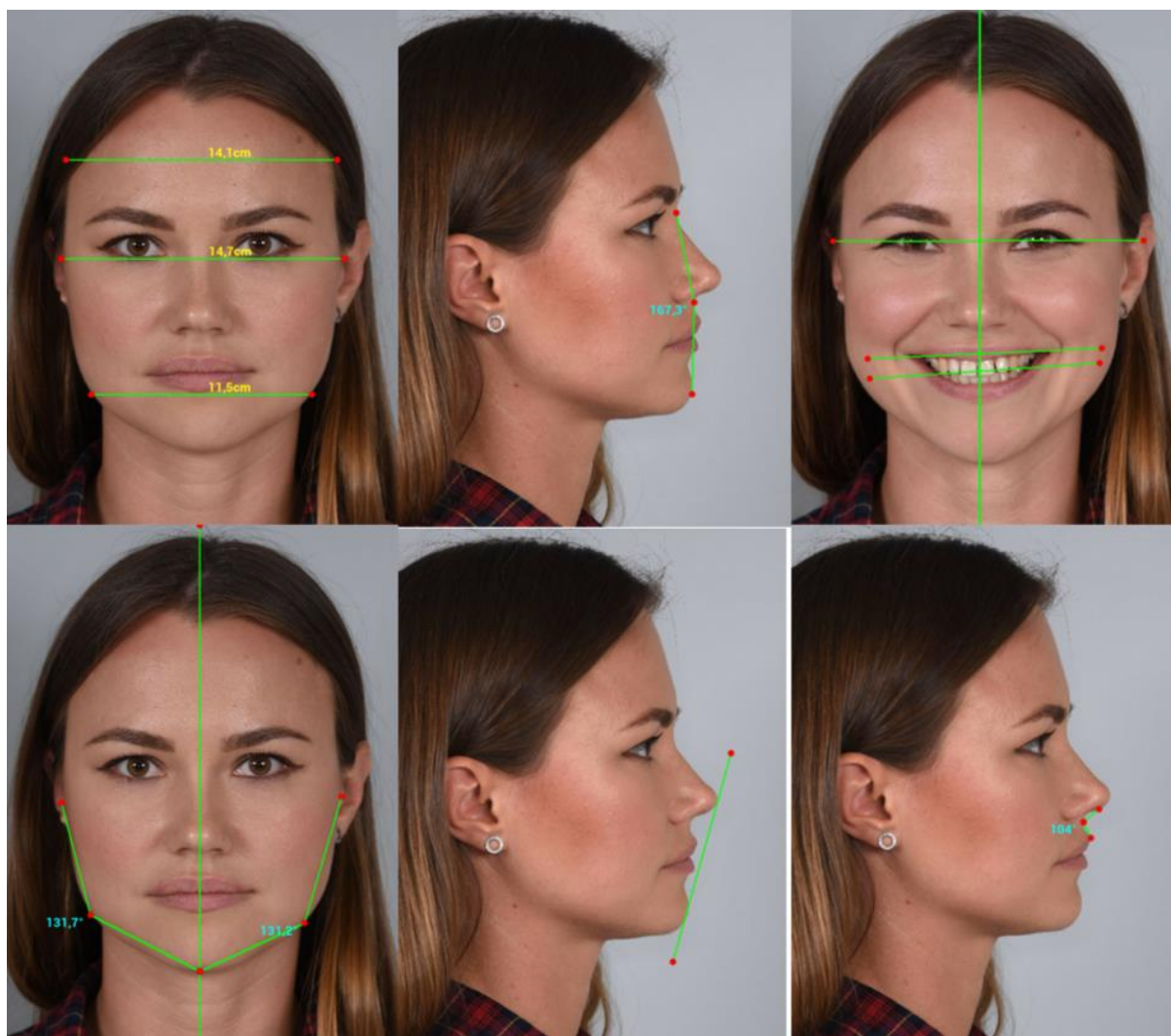


Рисунок 2 – Проведение измерений лицевых параметров пациента в модуле «Фотометрия»

При анализе внутриротовых фотографий оценивалось совпадение средних линий верхней и нижней челюстей, характер их изменения при открывании рта, соотношение клыков и первых моляров, а также симметричность зубных рядов на окклюзионных изображениях (рисунок 3).



Рисунок 3 – Проведение измерений параметров зубных рядов пациента в модуле «Фотометрия»: А – верхний; Б – нижний.

На третьем этапе разработки была создана система автоматических расчётов. После нанесения точек программа рассчитывала линейные расстояния между ними, угловые параметры и соотношения отдельных морфометрических показателей. При наличии заданного масштаба измерения могли быть переведены из пикселей в условные или метрические единицы. При отсутствии масштаба использовались относительные индексы и угловые величины, не зависящие от абсолютного размера изображения.

На четвёртом этапе была реализована визуализация результатов. На изображении отображались нанесённые точки, соединяющие линии, оси, плоскости, углы и подписи к измеренным параметрам. Предусматривалась возможность включения и отключения отдельных элементов визуализации, что позволяло врачу последовательно анализировать каждый диагностический признак без перегрузки изображения.

На пятом этапе была разработана система формирования отчёта. В отчёт включались исходная фотография, нанесённые антропометрические точки, рассчитанные параметры, нормативные значения и заключение о соответствии или несоответствии полученных данных норме. Для каждого показателя предусматривалась интерпретация по типу: «попадает в норму» или «не попадает в норму».

На шестом этапе была предусмотрена возможность сохранения изображения, нанесённых точек, расчётов и итогового заключения в базе данных с последующим экспортом отчёта в электронный документ.

Таким образом, разработанный цифровой способ фотометрического анализа был построен как последовательный диагностический алгоритм: загрузка изображения, выбор типа фотографии, нанесение антропометрических ориентиров, автоматический расчёт параметров, визуализация результата, интерпретация полученных данных и сохранение отчёта.

2.2.3. Методика оценки диагностической эффективности цифрового фотометрического анализа

После завершения разработки цифрового способа фотометрического анализа проводилась оценка его диагностической эффективности в сравнении с традиционными антропометрическими методами, применяемыми в ортодонтической практике. Основной целью данного этапа являлось определение точности, воспроизводимости, временной эффективности и диагностической информативности разработанного цифрового метода, а также оценка возможности его практического применения при комплексной ортодонтической диагностике.

Целью данного этапа было определить, насколько результаты цифрового фотометрического анализа сопоставимы с традиционными ручными антропометрическими измерениями, а также оценить воспроизводимость и временную эффективность предложенного метода.

Для сравнительного исследования были отобраны пациенты, нуждающиеся в ортодонтическом обследовании и планировании лечения. Всем пациентам выполнялся стандартный фотопротокол лица и полости рта. В анализ включались только фотографии надлежащего качества: с чётким изображением лица, правильным положением головы, достаточным

освещением, отсутствием выраженных поворотов и наклонов, а также с возможностью уверенного определения основных антропометрических точек.

Критерии включения пациентов в исследование

В исследование включались пациенты, соответствующие следующим критериям:

- возраст 21 год и старше;
- наличие постоянного прикуса;
- наличие зубочелюстной аномалии либо необходимость проведения ортодонтической диагностики;
- наличие полного фотопротокола лица и полости рта;
- возможность чёткого визуального определения антропометрических ориентиров;
- отсутствие ранее проведённых реконструктивных операций в челюстно-лицевой области;
- информированное согласие пациента на использование обезличенных диагностических данных.

Критерии невключения

Из исследования исключались пациенты:

- младше 21 года;
- с неполным фотопротоколом;
- с неудовлетворительным качеством фотографий;
- при наличии выраженного поворота или наклона головы на фотографии;
- при невозможности достоверного определения антропометрических точек;
- при наличии посттравматических или послеоперационных деформаций лица;
- при наличии выраженной асимметрии мягких тканей, связанной с опухолевыми, неврологическими или врождёнными заболеваниями;

- при наличии рубцовых изменений, препятствующих корректному фотометрическому анализу;
- при наличии активных воспалительных процессов мягких тканей лица;
- при наличии выраженных нарушений мимики или невозможности сохранения естественного положения головы во время фотопротокола.

Кроме того, из исследования исключались фотографии:

- с нарушением фокусировки;
- с недостаточным или неравномерным освещением;
- с выраженными тенями в области антропометрических ориентиров;
- с изменением естественного положения головы пациента;
- с использованием фильтров, изменяющих геометрию изображения.

Возрастное ограничение было введено для исключения влияния продолжающегося роста лицевого скелета и возрастной вариабельности антропометрических параметров, характерных для подросткового периода. Использование только взрослых пациентов позволяло получать более стабильные и сопоставимые результаты измерений.

В исследование были включены 60 пациентов, соответствующих критериям включения и невключения. Все пациенты проходили ортодонтическое обследование и имели полный фотопротокол лица и полости рта.

Поскольку задачей данного этапа являлось сравнение двух способов анализа одних и тех же диагностических данных, разделение пациентов на независимые клинические группы не проводилось. Каждый пациент одновременно являлся объектом исследования как для традиционного антропометрического анализа, так и для цифрового фотометрического анализа. Таким образом, у каждого пациента выполнялись два варианта исследования:

- традиционный антропометрический анализ портретных фотографий;
- цифровой фотометрический анализ с использованием разработанного цифрового модуля.

Для проведения сравнительного исследования была сформирована экспертная группа, состоящая из врачей-ортодонт. В исследование включались специалисты, имеющие высшее медицинское образование по специальности «Стоматология», действующий сертификат или аккредитацию по специальности «Ортодонтия», стаж практической работы врачом-ортодонтом не менее 10 лет, опыт проведения клинического фотометрического и антропометрического анализа пациентов, а также опыт работы с цифровыми диагностическими технологиями.

В исследование не включались специалисты со стажем работы менее 10 лет, не имеющие действующего сертификата врача-ортодонта, не осуществляющие регулярную клиническую практику или не имеющие опыта работы с фотометрическим анализом и цифровыми диагностическими системами.

Формирование экспертной группы было необходимо для минимизации случайных ошибок, связанных с недостаточным опытом исследователя, а также для объективной оценки воспроизводимости результатов при использовании традиционного и цифрового способов анализа.

Все измерения проводились тремя независимыми врачами-ортодонтами экспертной группы. Каждый специалист выполнял анализ фотографий самостоятельно и независимо от других исследователей.

Для каждого пациента анализ выполнялся двумя способами.

Первый способ представлял собой традиционный антропометрический анализ. Измерения проводились по распечатанным или электронным фотографиям с использованием линейки, транспортира и ручной разметки антропометрических точек. Врач определял основные ориентиры, проводил

линии и плоскости, измерял расстояния и углы, после чего заносил результаты в регистрационную карту.

Второй способ представлял собой цифровой фотометрический анализ. Те же фотографии загружались в разработанный цифровой модуль. После расстановки антропометрических точек программа автоматически рассчитывала линейные и угловые параметры, определяла соотношения между ними и формировала заключение по каждому показателю.

Для уменьшения влияния случайных ошибок каждое измерение проводили не один раз, а трижды. Оценку параметров выполняли три независимых специалиста экспертной группы. Часть фотографий дополнительно анализировали повторно через 10–14 дней без доступа к предыдущим результатам. Такой подход позволял оценить как различия между исследователями, так и стабильность повторных измерений у одного и того же специалиста.

Общее число измерительных циклов рассчитывали по формуле:

$$60 \times 2 \times 3 \times 3 = 1080$$

где:

60 — число пациентов;

2 — количество сравниваемых методов;

3 — количество исследователей;

3 — число повторных измерений.

Такой объем наблюдений был достаточен для объективной оценки диагностических возможностей разработанного цифрового метода.

Для каждого показателя определяли среднее значение трех последовательных измерений:

Для каждого показателя определяли среднее значение трех последовательных измерений:

$$X_{avg} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}$$

где X_1, X_2, X_3 — результаты трех последовательных измерений.

Например, при измерении морфологической ширины лица были получены значения 134 мм, 135 мм и 134 мм. Средний показатель рассчитывали следующим образом:

$$X_{avg} = \frac{134 + 135 + 134}{3} = 134,3 \text{ мм}$$

Проведение трех последовательных измерений позволяло уменьшить влияние случайных отклонений и повысить надежность итоговых данных.

Для оценки эффективности цифрового метода анализировали точность измерений, воспроизводимость результатов, затраты времени на исследование, совпадение диагностических заключений и удобство практического применения.

Точность измерений

Оценивали различия между результатами традиционного и цифрового анализа по основным линейным и угловым параметрам. Для линейных показателей учитывали разницу в миллиметрах или условных единицах, для угловых — в градусах.

Сравнение проводили по следующим параметрам: ширина головы (eu—eu), морфологическая ширина лица (zy—zy), гониальная ширина лица (go—go), полная морфологическая высота лица (oph—gn), средняя морфологическая высота лица (oph—sn), нижняя морфологическая высота лица (sn—gn), угол профиля лица, носогубный угол, положение губ относительно эстетической линии Риккетса и угол наклона окклюзионной плоскости.

Абсолютную ошибку измерения рассчитывали по формуле:

$$\Delta = |X_d - X_t|$$

где X_d — значение параметра при цифровом анализе, X_t — результат традиционного измерения.

Например, если при традиционном измерении морфологическая ширина лица составляла 134 мм, а при цифровом — 135 мм, абсолютная ошибка была равна:

$$\Delta = |135 - 134| = 1 \text{ мм}$$

Дополнительно рассчитывали относительную ошибку:

$$\delta = \frac{|X_d - X_t|}{X_t} \times 100\%$$

В приведенном примере:

$$\delta = \frac{1}{134} \times 100 = 0,75\%$$

Небольшое значение относительной ошибки указывало на высокую точность цифрового анализа.

Воспроизводимость результатов

Для оценки воспроизводимости измерения выполняли два независимых исследователя. Часть фотографий повторно анализировали через 10–14 дней без доступа к исходным результатам. Это позволяло оценить как различия между исследователями, так и стабильность повторных измерений у одного специалиста.

Воспроизводимость отдельно анализировали для межоператорских и внутриоператорских измерений. Основным показателем служил коэффициент внутриклассовой корреляции (ICC).

Значения ICC более 0,90 расценивались как отличная воспроизводимость, значения от 0,75 до 0,90 — как хорошая воспроизводимость, а значения менее 0,75 — как недостаточная воспроизводимость. Например, при ICC = 0,94 результаты цифрового анализа считались высоко воспроизводимыми.

Для оценки стабильности измерений дополнительно рассчитывалась ошибка метода по формуле Дальберга:

$$ME = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

где d — разница между повторными измерениями, n — количество объектов исследования.

Например, при различиях между повторными измерениями 0,5 мм, 1 мм, 0,5 мм, 1 мм и 0 мм расчёт проводился следующим образом:

$$ME = \sqrt{\frac{0,25 + 1 + 0,25 + 1 + 0}{2 \times 5}}$$

$$ME = \sqrt{\frac{2,5}{10}}$$

$$ME = \sqrt{0,25} = 0,5 \text{ мм}$$

Чем меньше была ошибка метода, тем выше считалась стабильность и воспроизводимость измерений.

Для дополнительной оценки стабильности результатов рассчитывался коэффициент вариации:

$$CV = \frac{SD}{M} \times 100\%$$

где SD — стандартное отклонение, M — среднее значение показателя.

Например, при среднем значении ширины лица 134 мм и стандартном отклонении 1,2 мм коэффициент вариации составлял:

$$CV = \frac{1,2}{134} \times 100 = 0,9\%$$

Низкие значения коэффициента вариации свидетельствовали о высокой стабильности измерений.

Для визуальной оценки согласованности цифрового и традиционного способов анализа применялся метод Bland–Altman. Для каждого измерения рассчитывались среднее значение двух методов и разница между ними.

Среднее значение рассчитывали по формуле:

$$M = \frac{X_d + X_t}{2}$$

Разницу между результатами цифрового и традиционного методов определяли следующим образом:

$$D = X_d - X_t$$

Например, если при традиционном измерении значение составляло 134 мм, а при цифровом — 135 мм:

$$M = \frac{135 + 134}{2} = 134,5$$

$$D = 135 - 134 = 1 \text{ мм}$$

Небольшая разница между результатами указывала на хорошее совпадение показателей при использовании двух методов анализа.

Временная эффективность

Отдельно оценивали время, необходимое для проведения полного анализа одной фотографии или фотопротокола при традиционном и цифровом подходе. Отсчет начинался с момента открытия изображения и заканчивался после внесения результатов в регистрационную форму или формирования итогового заключения.

Для каждого пациента фиксировали продолжительность традиционного и цифрового анализа. Среднее время рассчитывали по формуле:

$$T_{avg} = \frac{\sum T}{n}$$

где T — время исследования одного пациента, n — число проведенных исследований.

Например, если цифровой анализ пяти пациентов занимал 4, 5, 4, 6 и 5 минут, среднее значение составляло:

$$T_{avg} = \frac{4 + 5 + 4 + 6 + 5}{5} = 4,8 \text{ мин}$$

После этого определяли процент сокращения времени:

$$E_t = \frac{T_t - T_d}{T_t} \times 100\%$$

где T_t — время традиционного анализа, T_d — время цифрового анализа.

Например, если традиционный анализ занимал 14 минут, а цифровой — 5 минут:

$$E_t = \frac{14 - 5}{14} \times 100 = 64,3\%$$

Полученные данные показывали, что использование цифрового метода позволяет существенно сократить время диагностики.

Дополнительно оценивали совпадение диагностических заключений. Сравнивали результаты по типу лица, форме профиля, степени уменьшения нижней трети лица, асимметрии, несовпадению средних линий, наклону окклюзионной плоскости, положению губ относительно эстетической линии и изменению носогубного угла.

Процент совпадения рассчитывали по формуле:

$$C = \frac{N_c}{N} \times 100\%$$

где N_c — число совпадающих заключений, N — общее количество случаев.

Например, если совпадение было получено в 47 из 50 наблюдений:

$$C = \frac{47}{50} \times 100 = 94\%$$

Высокий процент совпадения свидетельствовал о сопоставимой диагностической информативности цифрового и традиционного методов.

После завершения исследования специалисты экспертной группы дополнительно оценивали удобство применения цифрового метода на практике. Учитывали удобство нанесения антропометрических точек, качество визуализации, скорость получения результата, возможность повторного анализа, удобство хранения данных и формирования отчётов.

Каждый показатель оценивался по пятибалльной шкале, где 1 балл соответствовал минимальному уровню удобства, а 5 баллов — максимальному. Средняя экспертная оценка рассчитывалась по формуле:

$$S = \frac{\sum x}{n}$$

где x — оценка каждого исследователя, n — количество исследователей.

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием программ Microsoft Excel и Statistica. Для каждого параметра рассчитывались среднее значение, стандартное отклонение, медиана, минимальные и максимальные значения. Нормальность распределения проверялась критерием Шапиро–Уилка. При нормальном распределении данных применялся *t*-критерий Стьюдента для связанных выборок, при распределении, отличном от нормального, использовался критерий Уилкоксона. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Диагностическая эффективность цифрового фотометрического анализа считалась подтверждённой при отсутствии статистически значимых различий между цифровыми и традиционными измерениями, минимальной абсолютной и относительной ошибке измерений, высоком коэффициенте внутриклассовой корреляции, низкой ошибке метода по Дальбергу, низком коэффициенте вариации, высокой межоператорской воспроизводимости, сокращении времени выполнения анализа, высоком проценте совпадения диагностических заключений и высокой экспертной оценке удобства применения метода.

Таким образом, оценка эффективности разработанного цифрового способа фотометрического анализа основывалась не только на сопоставлении отдельных числовых параметров, но и на комплексной оценке точности, стабильности результатов, воспроизводимости измерений, межоператорской согласованности, временной эффективности и практической применимости метода в клинической ортодонтической практике.

2.3 Материал и метод разработки цифрового способа биометрического анализа зубных рядов

Следующим этапом исследования стала разработка цифрового способа биометрического анализа зубных рядов на основании внутриротовых оптических слепков пациента и последующая оценка его диагностической

эффективности в сравнении с традиционными мануальными измерениями гипсовых диагностических моделей.

Необходимость выполнения данного этапа была связана с тем, что биометрическое исследование зубных рядов является одним из базовых компонентов ортодонтической диагностики. Именно результаты биометрического анализа позволяют определить размеры зубов, форму и размеры зубных дуг, наличие дефицита места, нарушения межзубных соотношений, особенности окклюзии и необходимость изменения параметров зубного ряда в процессе ортодонтического лечения.

Несмотря на широкое распространение традиционных методов анализа гипсовых моделей, их использование сопровождается рядом ограничений. Проведение измерений вручную требует значительных временных затрат, зависит от точности разметки ориентиров, опыта врача и качества гипсовой модели. Дополнительные сложности связаны с хранением моделей, невозможностью быстрого повторного анализа и ограниченными возможностями интеграции результатов измерений в цифровой протокол планирования лечения.

Развитие внутриротового сканирования и технологий трёхмерного моделирования позволило перейти к использованию цифровых моделей зубных рядов, пригодных для проведения высокоточного биометрического анализа. Однако большинство существующих программ ориентированы преимущественно на визуализацию моделей или выполнение отдельных измерений и не обеспечивают полноценного комплексного ортодонтического анализа с автоматическим расчётом диагностических индексов и формированием заключения.

В связи с этим целью данного этапа исследования являлась разработка цифрового способа биометрического анализа зубных рядов, позволяющего выполнять комплексное исследование виртуальных моделей, автоматически рассчитывать основные ортодонтические показатели и обеспечивать

сопоставимую или более высокую точность по сравнению с традиционными измерениями гипсовых моделей.

Разработка цифрового способа биометрического анализа проводилась в два последовательных этапа. На первом этапе создавалась структура цифрового диагностического модуля: определялись поддерживаемые форматы моделей, методы взаимодействия с виртуальной моделью, перечень измеряемых параметров, диагностические алгоритмы и система формирования отчёта. На втором этапе проводилась оценка диагностической эффективности разработанного способа путём сравнительного анализа результатов цифровых измерений и традиционных мануальных измерений гипсовых диагностических моделей.

2.3.1. Материал для разработки цифрового способа биометрического анализа зубных рядов

Материалом для разработки цифрового способа служили внутриротовые оптические слепки зубных рядов пациентов, полученные методом интраорального сканирования, а также соответствующие гипсовые диагностические модели, изготовленные традиционным лабораторным способом.

Для получения цифровых моделей использовались внутриротовые сканеры, обеспечивающие создание трёхмерных моделей зубных рядов в форматах STL и OBJ. Все виртуальные модели формировались по стандартному протоколу сканирования верхней и нижней челюсти, а также регистрации окклюзии.

Основной задачей при разработке метода являлось создание цифрового инструмента, позволяющего загружать трёхмерные модели зубных рядов, наносить диагностические ориентиры, выполнять линейные и угловые измерения, рассчитывать ортодонтические индексы, анализировать форму и размеры зубных дуг и формировать итоговое диагностическое заключение.

Техническая реализация цифрового способа предусматривала: загрузку моделей в форматах STL и OBJ; работу с моделями из локального хранилища или базы данных; отображение трёхмерной модели в рабочем пространстве программы; вращение, масштабирование и позиционирование модели; расстановку, перемещение и удаление диагностических точек; автоматический расчёт линейных и угловых параметров; визуализацию измерений; сохранение данных и экспорт итогового отчёта.

В качестве программной среды для реализации цифрового способа была выбрана Unreal Engine 5.4 с использованием языка C++ и библиотеки Assimp для импорта трёхмерных моделей. Выбор данной платформы был обусловлен возможностью работы с высокополигональными объектами, построения интерактивного пользовательского интерфейса, выполнения пространственных вычислений и последующего объединения биометрического модуля с другими диагностическими блоками комплексной системы цифрового ортодонтического планирования.

2.3.2. Методика разработки цифрового способа биометрического анализа зубных рядов

Разработка цифрового способа биометрического анализа проводилась поэтапно.

На первом этапе был сформирован пользовательский интерфейс, обеспечивающий загрузку трёхмерных моделей верхнего и нижнего зубных рядов. После загрузки модель автоматически отображалась в рабочем пространстве программы с возможностью масштабирования, вращения и изменения положения в трёхмерной системе координат.

При разработке интерфейса особое внимание уделялось возможности точного позиционирования модели и удобству работы с диагностическими ориентирами. Пользователь получал возможность свободно изменять ракурс

модели, выделять отдельные участки зубного ряда и выполнять последовательный анализ различных анатомических структур.

На втором этапе была разработана система нанесения диагностических ориентиров на поверхность виртуальной модели. Пользователь мог устанавливать точки в области режущих краёв, бугров, контактных пунктов и других анатомических ориентиров зубов. Для удобства восприятия каждая точка имела обозначение и нумерацию (рисунок 4).

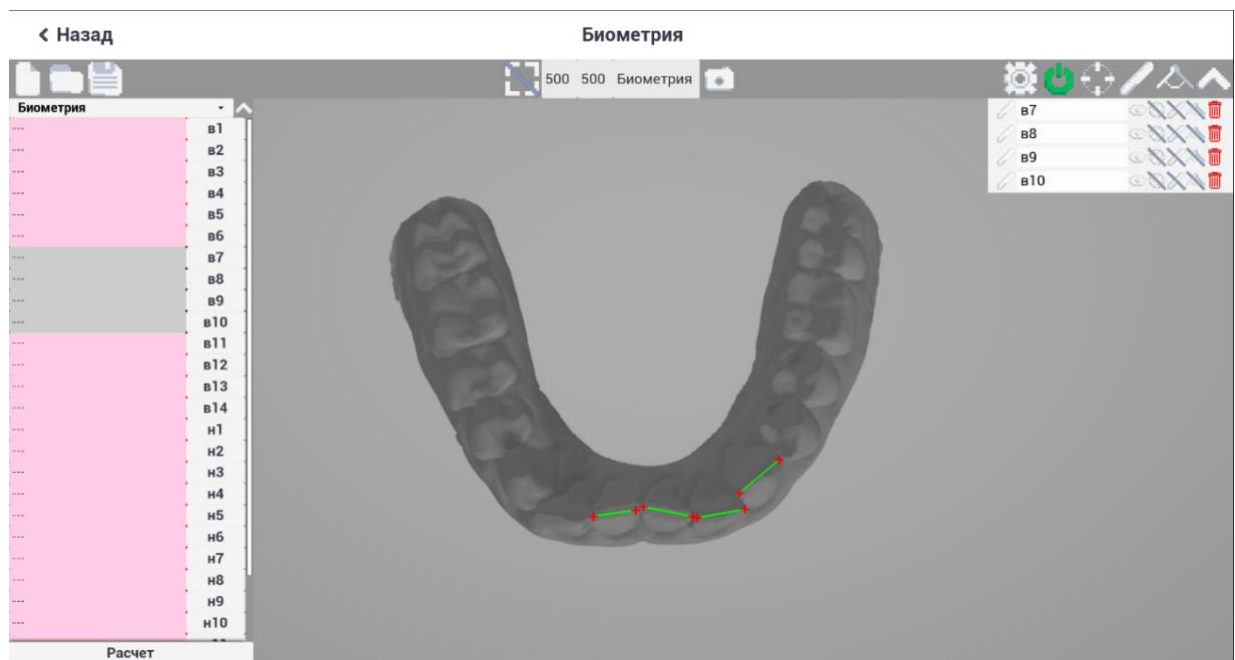


Рисунок 4 – Интерфейс модуля «Биометрия» с нанесенными на виртуальную модель нижнего зубного ряда меток для последующих расчетов

Программа предусматривала возможность:

- перемещения ранее установленных точек;
- удаления ошибочно нанесённых ориентиров;
- повторной разметки модели;
- выбора типа диагностической точки;
- сохранения расположения ориентиров для повторного анализа.

После завершения этапа разметки программа автоматически выполняла вычисления линейных расстояний, угловых параметров и диагностических соотношений между отдельными участками зубных рядов.

В структуру цифрового анализа были включены основные методы ортодонтической биометрии, применяемые в клинической практике.

Первым этапом выполнялось измерение мезиодистальных размеров зубов верхней и нижней челюсти. Измерение проводилось между наиболее выступающими контактными точками зуба на виртуальной модели. Полученные данные автоматически суммировались для последующего расчёта диагностических индексов.

Следующим этапом проводили расчет индекса Тона. Программа автоматически определяла соотношение суммы ширины верхних резцов к сумме ширины нижних резцов. Если показатель превышал 1,33, это указывало на возможную макродентию верхних резцов или уменьшение размеров нижних резцов, что могло сопровождаться тенденцией к глубокому перекрытию. При значении ниже 1,33 предполагались уменьшенные размеры верхних резцов либо увеличение размеров нижних, что могло быть связано с формированием дизокклюзии. Показатель, близкий к 1,33, расценивали как вариант нормы.

После этого программа автоматически выполняла анализ Болтона для 6 и 12 зубов. Определялось соотношение суммарной ширины нижних зубов к ширине верхних, после чего рассчитывался дефицит или избыток размеров зубов. На основании полученных данных программа формировала рекомендации по необходимости сепарации или восстановления анатомической ширины отдельных зубов с помощью реставрационных методов.

Далее проводили анализ по Пону. После нанесения ориентиров в области премоляров и моляров программа автоматически определяла фактическую ширину зубного ряда и рассчитывала индивидуальные нормативные значения с учетом суммы мезиодистальных размеров резцов. Затем выполнялось сравнение полученных данных с определением степени сужения или расширения зубного ряда.

Дополнительно использовали метод Слабковской для анализа ширины зубного ряда в области клыков, а также метод Корхауза, который применяли для оценки длины переднего отдела зубного ряда и выявления его укорочения либо удлинения.

В структуру цифрового анализа также входил метод Снагиной, позволяющий оценивать длину и ширину апикального базиса, а также анализировать соотношение сегментов зубного ряда по Герлаху. Программа автоматически сопоставляла размеры боковых и передних сегментов зубных дуг и определяла степень их соответствия друг другу.

Отдельным этапом была оценка дефицита или избытка места в зубном ряду. Для этого программа автоматически подсчитывала сумму мезиодистальных размеров зубов и сравнивала её с длиной зубного ряда по методу Нанса.

Разница между полученными величинами определяла наличие дефицита или избытка места.

Дополнительно проводилась оценка симметричности зубных рядов с определением различий между правой и левой сторонами, а также анализ глубины кривой Шпее. Глубина кривой определялась как расстояние от режущего края центрального резца до наиболее глубокой точки окклюзионной кривой в области первых моляров нижней челюсти.

На следующем этапе разработки была реализована система визуализации результатов. После выполнения расчётов программа отображала нанесённые ориентиры, линии измерений, плоскости и углы непосредственно на трёхмерной модели зубных рядов. Для повышения наглядности использовалась динамическая подсветка выбранных элементов и возможность последовательного включения и отключения отдельных диагностических параметров.

Следующим этапом являлась разработка системы формирования отчёта. В итоговый отчёт автоматически включались: – изображения виртуальных

моделей; нанесённые диагностические ориентиры; результаты линейных измерений; рассчитанные индексы; нормативные значения; интерпретация результатов; итоговое диагностическое заключение (Рисунок 5).

Для каждого параметра программа автоматически определяла соответствие или несоответствие нормативным значениям и формировала заключение по типу: «попадает в норму» или «не попадает в норму».



Рисунок 5 – Интерфейс модуля «Биометрия» с автоматически сформированным отчетом после нанесения всех меток

Дополнительно предусматривалась возможность сохранения модели, диагностических точек, результатов измерений и итогового заключения в базе данных с последующим экспортом отчёта в форматы PDF или PPTX.

Таким образом, разработанный цифровой способ биометрического анализа представлял собой последовательный диагностический алгоритм, включающий загрузку трёхмерной модели, нанесение диагностических ориентиров, автоматическое выполнение расчётов, визуализацию результатов, формирование заключения и сохранение данных исследования.

2.3.3. Методика оценки диагностической эффективности цифрового способа биометрического анализа зубных рядов

После завершения разработки цифрового способа биометрического анализа зубных рядов была проведена оценка его диагностической

эффективности в сравнении с традиционными мануальными измерениями гипсовых диагностических моделей. Исследование выполнялось у тех же 60 пациентов, которые были включены в предыдущий этап работы и соответствовали ранее описанным критериям включения и невключения. Оценка проводилась той же экспертной группой, состоявшей из трёх врачей-ортодонтос с действующим сертификатом или аккредитацией по специальности «Ортодонтия» и стажем практической работы не менее 10 лет.

Для каждого пациента использовали две пары диагностических объектов: гипсовые модели верхней и нижней челюсти, изготовленные традиционным способом, и соответствующие им цифровые модели зубных рядов, полученные по данным внутриротового оптического сканирования. Такая организация исследования позволяла сравнивать не разные клинические случаи, а два способа измерения одних и тех же зубных рядов, что повышало корректность статистического анализа и снижало влияние индивидуальных анатомических различий между пациентами.

У каждого пациента выполнялись два варианта биометрического исследования: традиционный мануальный анализ гипсовых диагностических моделей и цифровой анализ виртуальных моделей зубных рядов. При традиционном анализе измерения проводились на гипсовых или напечатанных моделях с использованием штангенциркуля, линейки и ручной разметки диагностических ориентиров (рисунок 6).



А



Б

Рисунок 6 – Мануальное проведение расчетов: А – штангенциркулем; Б - линейкой

При цифровом анализе соответствующие внутриротовые оптические слепки загружались в разработанный модуль биометрии, после чего на виртуальной модели наносились диагностические точки, а программа автоматически рассчитывала линейные параметры, индексы и диагностические соотношения.

Измерения проводились тремя независимыми специалистами экспертной группы. Каждый исследователь выполнял анализ самостоятельно и не имел доступа к результатам других специалистов. Для уменьшения влияния случайной ошибки каждый параметр определялся трижды, после чего рассчитывалось среднее значение трёх последовательных измерений. Повторный анализ части моделей выполнялся через 10–14 дней без доступа к первичным результатам, что позволяло оценить внутриоператорскую и межоператорскую воспроизводимость как для традиционного, так и для цифрового метода.

Общее количество измерительных циклов рассчитывалось по формуле:

$$N = n \times m \times e \times r$$

где n — количество пациентов, m — количество сравниваемых методов, e — количество экспертов, r — количество повторных измерений.

В настоящем исследовании:

$$N = 60 \times 2 \times 3 \times 3 = 1080$$

Таким образом, общий объём измерительных циклов составил 1080, что обеспечивало достаточную базу для оценки точности, стабильности и воспроизводимости цифрового биометрического анализа.

Для каждого параметра рассчитывалось среднее значение трёх последовательных измерений:

$$X_{avg} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}$$

где X_1, X_2, X_3 — результаты трёх последовательных измерений.

Например, при трёх измерениях мезиодистального размера зуба 1.1 были получены значения 8,5 мм, 8,6 мм и 8,5 мм. Среднее значение составляло:

$$X_{avg} = \frac{8,5 + 8,6 + 8,5}{3} = 8,53 \text{ мм}$$

Именно среднее значение использовалось далее для сравнения традиционного и цифрового способов анализа.

Оценка диагностической эффективности цифрового способа биометрического анализа проводилась по нескольким критериям: точность линейных измерений, точность расчёта диагностических индексов, воспроизводимость результатов, ошибка метода, временная эффективность, совпадение диагностических заключений и практическое удобство применения метода.

Первым критерием являлась точность линейных измерений. Она определялась путём сопоставления результатов цифрового анализа с результатами мануальных измерений гипсовых моделей. Сравнение проводилось по мезиодистальным размерам зубов, ширине зубных рядов в области премоляров и моляров, длине переднего отрезка зубного ряда, длине зубной дуги по методу Нанса, ширине и длине апикального базиса, глубине кривой Шпее, а также параметрам симметричности правой и левой половины зубного ряда.

Абсолютная ошибка измерения рассчитывалась по формуле:

$$\Delta = |X_d - X_m|$$

где X_d — значение параметра при цифровом анализе, X_m — значение параметра при мануальном измерении гипсовой модели.

Например, если мезиодистальный размер зуба 1.1 при мануальном измерении составил 8,5 мм, а при цифровом анализе — 8,6 мм, абсолютная ошибка составляла:

$$\Delta = |8,6 - 8,5| = 0,1 \text{ мм}$$

Дополнительно рассчитывалась относительная ошибка:

$$\delta = \frac{|X_d - X_m|}{X_m} \times 100\%$$

В приведённом примере:

$$\delta = \frac{0,1}{8,5} \times 100 = 1,18\%$$

Низкое значение абсолютной и относительной ошибки рассматривалось как показатель высокой точности цифрового анализа.

Вторым критерием являлась точность расчёта диагностических индексов. Для этого сравнивались результаты, полученные цифровым и традиционным способом, по индексу Тона, индексу Болтона для 6 и 12 зубов, анализу Пона, анализу Корхауза, соотношению сегментов по Герлаху, дефициту или избытку места в зубном ряду и глубине кривой Шпее.

Индекс Тона рассчитывался как отношение суммы мезиодистальных размеров четырёх верхних резцов к сумме мезиодистальных размеров четырёх нижних резцов:

$$I_T = \frac{\sum MD_{\text{верхних резцов}}}{\sum MD_{\text{нижних резцов}}}$$

Например, если сумма ширины верхних резцов составляла 31,8 мм, а сумма ширины нижних резцов — 23,9 мм, индекс Тона составлял:

$$I_T = \frac{31,8}{23,9} = 1,33$$

Такое значение расценивалось как соответствующее норме.

Индекс Болтона для переднего сегмента рассчитывался по формуле:

$$B_6 = \frac{\sum MD_{6 \text{ нижних зубов}}}{\sum MD_{6 \text{ верхних зубов}}} \times 100\%$$

Например, при сумме мезиодистальных размеров шести нижних зубов 36,2 мм и шести верхних зубов 46,9 мм:

$$B_6 = \frac{36,2}{46,9} \times 100 = 77,2\%$$

Полученное значение соответствовало нормативному показателю переднего индекса Болтона.

Общий индекс Болтона рассчитывался аналогично для 12 зубов:

$$B_{12} = \frac{\sum MD_{12 \text{ нижних зубов}}}{\sum MD_{12 \text{ верхних зубов}}} \times 100\%$$

Например, при сумме 12 нижних зубов 91,3 мм и 12 верхних зубов 100,0 мм:

$$B_{12} = \frac{91,3}{100,0} \times 100 = 91,3\%$$

Данное значение соответствовало нормативному соотношению размеров зубов верхней и нижней челюсти.

Для анализа Пона рассчитывалась индивидуальная норма ширины зубного ряда в области премоляров и моляров. В цифровом модуле расчёт выполнялся автоматически после внесения суммы мезиодистальных размеров резцов.

Норма ширины в области премоляров определялась по формуле:

$$N_{prem} = \sum MD_{резцов} \times 1,25$$

Норма ширины в области моляров:

$$N_{mol} = \sum MD_{резцов} \times 1,54$$

После этого рассчитывалось отклонение фактической ширины от индивидуальной нормы:

$$D = W_f - N$$

где W_f — фактическая ширина зубного ряда, N — индивидуальная норма.

Например, при сумме мезиодистальных размеров резцов 32 мм индивидуальная норма ширины в области премоляров составляла:

$$N_{prem} = 32 \times 1,25 = 40,0 \text{ мм}$$

Если фактическая ширина зубного ряда была 37,5 мм, отклонение составляло:

$$D = 37,5 - 40,0 = -2,5 \text{ мм}$$

Отрицательное значение указывало на сужение зубного ряда.

Для анализа Корхауза сравнивалась фактическая длина переднего отрезка зубного ряда с нормативным значением. Отклонение рассчитывалось по формуле:

$$D_K = L_f - L_n$$

где L_f — фактическая длина переднего отрезка, L_n — нормативная длина.

Например, если фактическая длина переднего отрезка составляла 18 мм, а нормативная — 20 мм:

$$D_K = 18 - 20 = -2 \text{ мм}$$

Такой результат указывал на укорочение переднего отрезка зубного ряда.

Для оценки дефицита или избытка места рассчитывали разницу между длиной зубного ряда и суммой мезиодистальных размеров зубов:

$$D_{space} = L_{arch} - \sum MD_{зубов}$$

где L_{arch} — длина зубного ряда по методу Нанса, $\sum MD_{зубов}$ — сумма мезиодистальных размеров зубов.

Например, при длине зубного ряда 72 мм и сумме ширины зубов 76 мм:

$$D_{space} = 72 - 76 = -4 \text{ мм}$$

Отрицательное значение свидетельствовало о дефиците места, положительное — об избытке места.

Глубина кривой Шпее определялась как максимальное вертикальное отклонение наиболее глубокой точки окклюзионной кривой от условной плоскости, проведённой через режущий край центрального резца и дистально-щечный бугор второго моляра нижней челюсти. Полученное цифровое значение сравнивалось с результатом ручного измерения на гипсовой модели.

Третьим критерием являлась воспроизводимость результатов. Она оценивалась отдельно для повторных измерений одним и тем же специалистом и для измерений, выполненных разными специалистами экспертной группы. Основным статистическим показателем воспроизводимости являлся коэффициент внутриклассовой корреляции (ICC). Значения ICC более 0,90 расценивались как отличная воспроизводимость,

значения от 0,75 до 0,90 — как хорошая воспроизводимость, значения менее 0,75 — как недостаточная воспроизводимость.

Например, если при цифровом измерении ширины зубного ряда в области премоляров значение ИСС составляло 0,96, результат расценивался как высоко воспроизводимый.

Для дополнительной оценки стабильности измерений использовалась ошибка метода по формуле Дальберга:

$$ME = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

где d — разница между первым и повторным измерением, n — количество повторных измерений.

Например, если различия между повторными измерениями составили 0,1 мм, 0,2 мм, 0,1 мм, 0,3 мм и 0,1 мм, то:

$$ME = \sqrt{\frac{0,01 + 0,04 + 0,01 + 0,09 + 0,01}{2 \times 5}}$$

$$ME = \sqrt{\frac{0,16}{10}} = \sqrt{0,016} = 0,13 \text{ мм}$$

Низкое значение ошибки метода указывало на высокую стабильность измерений.

Дополнительно рассчитывался коэффициент вариации:

$$CV = \frac{SD}{M} \times 100\%$$

где SD — стандартное отклонение, M — среднее значение показателя.

Например, если средняя ширина зубного ряда составляла 40 мм, а стандартное отклонение повторных измерений — 0,4 мм:

$$CV = \frac{0,4}{40} \times 100 = 1,0\%$$

Низкий коэффициент вариации свидетельствовал о высокой стабильности цифрового измерения.

Для оценки согласованности цифрового и мануального способов измерения применялся анализ Bland–Altman. Для каждого параметра рассчитывались среднее значение двух методов и разница между ними:

$$M = \frac{X_d + X_m}{2}$$

$$D = X_d - X_m$$

где X_d — цифровое измерение, X_m — мануальное измерение гипсовой модели.

Например, если ширина зубного ряда по гипсовой модели составляла 38,0 мм, а по цифровой — 38,3 мм, среднее значение рассчитывали следующим образом:

$$M = \frac{38,3 + 38,0}{2} = 38,15 \text{ мм}$$

Разница между результатами составляла:

$$D = 38,3 - 38,0 = 0,3 \text{ мм}$$

Небольшое среднее смещение и отсутствие значительных различий между измерениями расценивали как показатель хорошего совпадения результатов двух методов.

Следующим этапом оценивали временные затраты. Для каждого пациента отдельно фиксировали время, необходимое для полного биометрического анализа традиционным способом и с использованием цифровой модели. Отсчет времени начинался с момента начала работы с моделью и завершался после получения итогового диагностического заключения.

Среднее время анализа рассчитывали по формуле:

$$T_{avg} = \frac{\sum T}{n}$$

где T — время анализа одного пациента, n — количество пациентов.

Например, если цифровой анализ пяти моделей занимал 12, 14, 13, 15 и 14 минут:

$$T_{avg} = \frac{12 + 14 + 13 + 15 + 14}{5} = 13,6 \text{ мин}$$

После этого определяли процент сокращения времени:

$$E_t = \frac{T_m - T_d}{T_m} \times 100\%$$

где T_m — продолжительность ручного анализа гипсовой модели, T_d — время цифрового анализа.

Например, если ручной анализ занимал 55 минут, а цифровой — 14 минут:

$$E_t = \frac{55 - 14}{55} \times 100 = 74,5\%$$

Такой результат показывал значительное уменьшение временных затрат при использовании цифрового метода.

Диагностическое совпадение оценивали по основным клиническим выводам, полученным в ходе биометрического анализа. Сравнивали заключения о наличии дефицита места, сужения зубного ряда, укорочения переднего отдела зубной дуги, нарушения симметрии, изменения глубины кривой Шпее и несоответствия сегментов по Герлаху.

Процент совпадения рассчитывали по формуле:

$$C = \frac{N_c}{N} \times 100\%$$

где N_c — число совпадающих заключений, N — общее количество заключений.

Например, если из 60 заключений по дефициту места совпадение результатов отмечалось в 58 случаях:

$$C = \frac{58}{60} \times 100 = 96,7\%$$

Высокий процент совпадения указывал на сопоставимую диагностическую информативность цифрового и традиционного методов анализа.

После завершения исследования специалисты экспертной группы отдельно оценивали удобство применения цифрового метода на практике. Учитывали удобство загрузки моделей, качество визуализации, простоту нанесения ориентиров, возможность повторного анализа, скорость получения расчетов, сохранения данных и формирования итогового отчета.

Каждый показатель оценивался по пятибалльной шкале, где 1 балл соответствовал минимальному уровню удобства, а 5 баллов — максимальному.

Средняя экспертная оценка рассчитывалась по формуле:

$$S = \frac{\sum x}{n}$$

где x — оценка каждого эксперта, n — количество экспертов.

Например, если три эксперта оценили удобство нанесения точек на 5, 4 и 5 баллов:

$$S = \frac{5 + 4 + 5}{3} = 4,67 \text{ балла}$$

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием программ Microsoft Excel и Statistica. Для каждого количественного параметра рассчитывались среднее значение, стандартное отклонение, медиана, минимальные и максимальные значения. Нормальность распределения проверялась с использованием критерия Шапиро–Уилка.

При нормальном распределении данных для сравнения цифрового и мануального методов применялся t -критерий Стьюдента для связанных выборок. При распределении, отличном от нормального, использовался критерий Уилкоксона. Для оценки согласованности результатов применяли коэффициент внутриклассовой корреляции и анализ Bland–Altman. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Диагностическая эффективность цифрового способа биометрического анализа зубных рядов считалась подтверждённой при отсутствии клинически значимых различий между цифровыми и мануальными измерениями, минимальной абсолютной и относительной ошибке, высоком коэффициенте внутриклассовой корреляции, низкой ошибке метода по Дальбергу, низком коэффициенте вариации, высокой межоператорской воспроизводимости, сокращении времени выполнения анализа, высоком проценте совпадения

диагностических заключений и высокой экспертной оценке удобства применения метода.

Таким образом, оценка эффективности разработанного цифрового способа биометрического анализа была построена на комплексном сравнении цифровых измерений внутриротовых оптических слепков и традиционных мануальных измерений гипсовых диагностических моделей с учётом точности, воспроизводимости, временных затрат, диагностического совпадения и практической применимости метода.

2.4 Материал и метод разработки цифрового способа цефалометрического анализа

Следующим этапом исследования стала разработка цифрового способа цефалометрической обработки телерентгенограмм в прямой и боковой проекциях и последующая оценка его диагностической эффективности в сравнении с классическими методами ручного трассирования рентгенограмм.

Необходимость выполнения данного этапа была обусловлена тем, что цефалометрический анализ на протяжении многих десятилетий остаётся одним из основных методов ортодонтической диагностики. Именно результаты цефалометрического исследования позволяют оценивать взаиморасположение челюстей, тип роста лицевого скелета, положение зубов относительно костных структур, наклон резцов, особенности мягкотканного профиля и степень выраженности скелетных нарушений.

Вместе с тем традиционная ручная обработка телерентгенограмм сопровождается рядом существенных ограничений. Ручное трассирование требует значительных временных затрат, зависит от качества рентгенограммы, точности определения анатомических ориентиров и опыта врача. Дополнительные сложности возникают при повторных измерениях, сравнении результатов разными специалистами и необходимости хранения большого количества диагностических данных. Даже при соблюдении

стандартного протокола ручной цефалометрии сохраняется вероятность межоператорских и внутриоператорских расхождений, особенно при определении сложных анатомических ориентиров.

Развитие цифровых технологий, появление современных рентгенологических систем и методов компьютерной обработки изображений создали условия для перехода к цифровой цефалометрии. Однако большинство существующих решений ориентированы преимущественно на выполнение ограниченного набора измерений и не обеспечивают полноценной интеграции цефалометрического анализа в единую цифровую систему ортодонтического планирования лечения.

В связи с этим целью данного этапа исследования являлась разработка цифрового способа цефалометрической обработки телерентгенограмм, позволяющего выполнять автоматизированный анализ рентгенологических параметров в прямой и боковой проекциях, рассчитывать основные диагностические показатели, визуализировать результаты исследования и обеспечивать высокую точность и воспроизводимость измерений по сравнению с традиционным ручным трассированием.

Разработка цифрового способа цефалометрического анализа проводилась в два последовательных этапа. На первом этапе создавалась структура цифрового диагностического модуля: определялись поддерживаемые форматы изображений, перечень анатомических ориентиров, диагностические алгоритмы, система визуализации и формирования отчёта. На втором этапе проводилась оценка диагностической эффективности разработанного способа путём сравнительного анализа результатов цифровой и традиционной ручной цефалометрии.

2.4.1. Материал для разработки цифрового способа цефалометрического анализа

Материалом для разработки цифрового способа служили телерентгенограммы головы пациентов в прямой и боковой проекциях, выполненные по стандартному ортодонтическому протоколу исследования.

В анализ включались цифровые телерентгенограммы в форматах PNG и JPG, полученные при стандартном положении головы пациента с использованием цефалостата и фиксированного фокусного расстояния. Все исследования выполнялись в условиях, обеспечивающих воспроизводимость положения головы и минимизацию геометрических искажений изображения.

Основной задачей при разработке метода являлось создание цифрового инструмента, позволяющего: загружать телерентгенограммы; выполнять масштабирование изображения; наносить анатомические ориентиры; автоматически рассчитывать линейные и угловые параметры; анализировать сагиттальные, вертикальные, линейные и мягкотканые показатели; оценивать положение резцов; проводить расчёты по Kim и Sassouni; визуализировать результаты; формировать итоговое диагностическое заключение.

Техническая реализация цифрового способа предусматривала:

- загрузку изображений из локального хранилища или базы данных;
- поддержку изображений в форматах PNG и JPG;
- отображение телерентгенограммы в рабочем пространстве программы;
- возможность масштабирования изображения;
- нанесение, перемещение и удаление анатомических ориентиров;
- автоматическое выполнение цефалометрических расчётов;
- визуализацию линий, плоскостей, углов и измеряемых параметров;
- сохранение результатов исследования;
- экспорт отчёта в форматы PDF и PPTX.

В качестве программной среды для реализации цифрового способа была выбрана Unreal Engine 5.4 с использованием языка C++ и/или Blueprints. Выбор данной платформы был обусловлен возможностью построения интерактивного пользовательского интерфейса, выполнения вычислительных операций, работы с цифровыми изображениями и последующего объединения цефалометрического модуля с другими диагностическими блоками комплексной системы цифрового ортодонтического планирования.

2.4.2. Методика разработки цифрового способа цефалометрического анализа

Разработка цифрового способа цефалометрического анализа проводилась поэтапно.

На первом этапе был разработан пользовательский интерфейс, обеспечивающий загрузку телерентгенограмм головы пациента в прямой и боковой проекциях. После загрузки изображения программа автоматически отображала рентгенограмму в рабочем поле с возможностью изменения масштаба, перемещения изображения и адаптации под размер рабочего окна (рисунок 8).

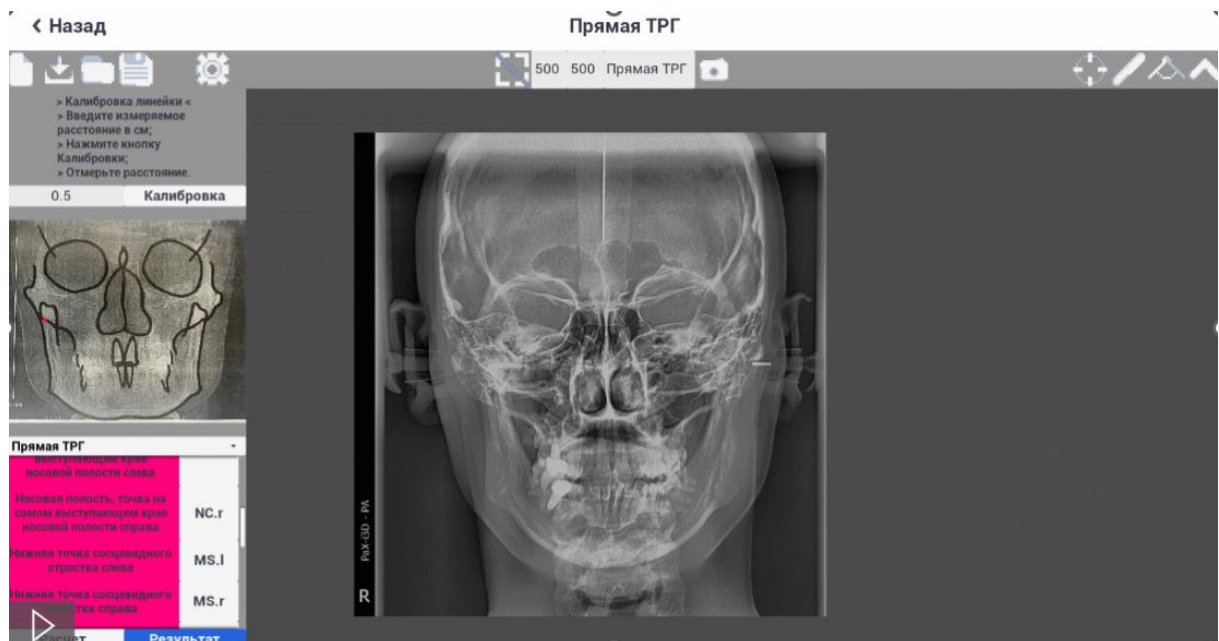


Рисунок 7 – Интерфейс модуля «Цефалометрия» с загруженным снимком ТРГ в прямой проекции

После загрузки телерентгенограммы предусматривалось выполнение масштабирования изображения. Масштабирование проводилось на основании известного калибровочного размера либо рентгенконтрастного ориентира, присутствующего на изображении. Это позволяло переводить измерения из пикселей в реальные линейные значения и обеспечивало сопоставимость результатов при последующем анализе (рисунок 8).

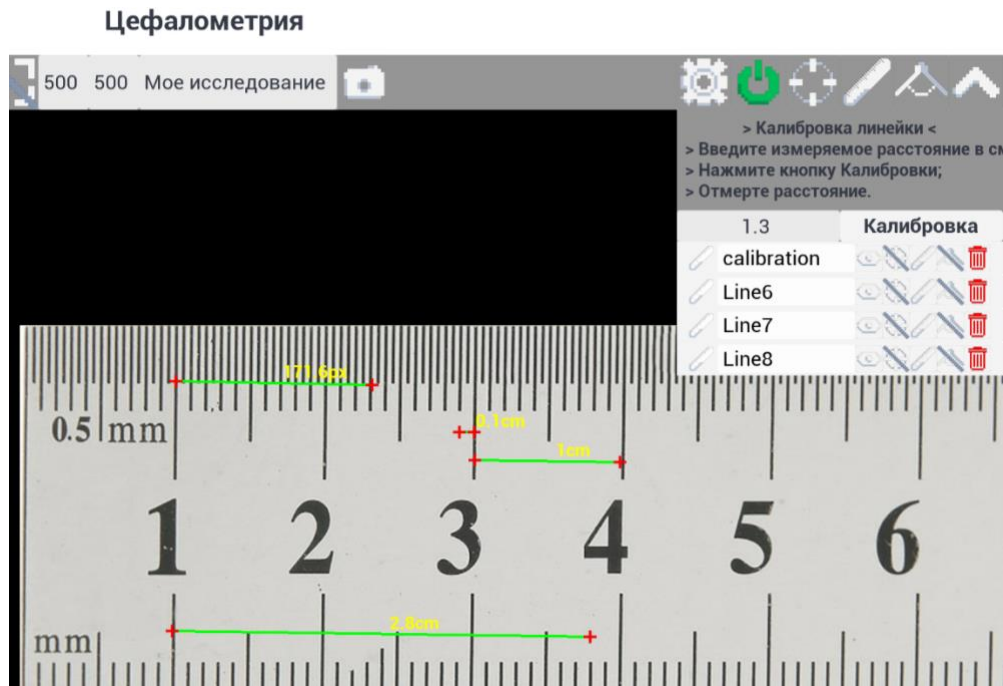


Рисунок 8 – Интерфейс модуля «Цефалометрия» функция калибровки снимка

Следующим этапом являлась разработка системы нанесения анатомических ориентиров. Пользователь получал возможность устанавливать диагностические точки на изображении, перемещать их, удалять ошибочно установленные ориентиры и выполнять повторную разметку рентгенограммы. Для удобства восприятия каждая точка имела обозначение и графическую маркировку (рисунок 9).

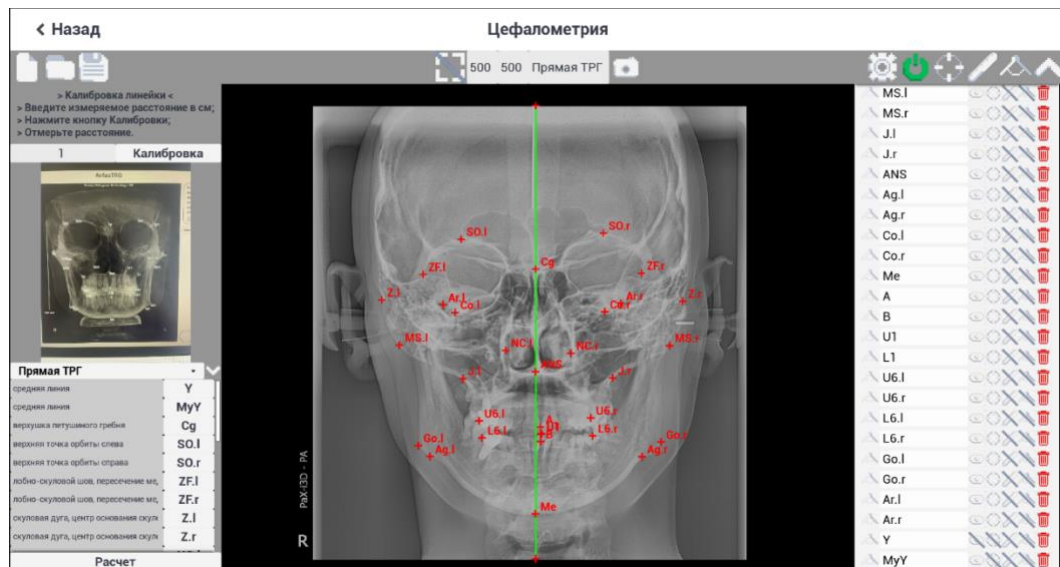


Рисунок 9 – Нанесение анатомических ориентиров в цифровом модуле программы «Цефалометрия»

При анализе телерентгенограмм в прямой проекции программа предусматривала нанесение основных анатомических ориентиров, используемых для оценки симметрии лицевого скелета и размеров апикального базиса челюстей:

- ZF — лобно-скуловой шов;
- Z — центр основания скуловой дуги;
- NC — наиболее выступающая точка наружного края носовой полости;
- Co — центр суставной головки;
- J — точка пересечения бугра верхней челюсти и скулового контрфорса;
- Go — точка угла нижней челюсти;
- Me — наиболее нижняя точка подбородка.

После нанесения указанных ориентиров программа автоматически проводила линейные измерения правой и левой сторон лицевого скелета и оценивала степень симметричности костных структур. При наличии значимых различий между правой и левой сторонами диагностировалась скелетная асимметрия.

Дополнительно выполнялось определение ширины апикального базиса верхней челюсти по расстоянию J–J, а также оценка ширины апикального базиса нижней челюсти.

Следующим этапом разработки являлась реализация цифрового анализа телерентгенограмм в боковой проекции.

В структуру цифрового анализа были включены: сагиттальные параметры; вертикальные параметры; линейные параметры; параметры наклона резцов; мягкотканые показатели; дополнительные параметры по Kim и Sassouni.

Для выполнения анализа программа предусматривала нанесение стандартных цефалометрических ориентиров и построение референтных плоскостей (рисунок 10).

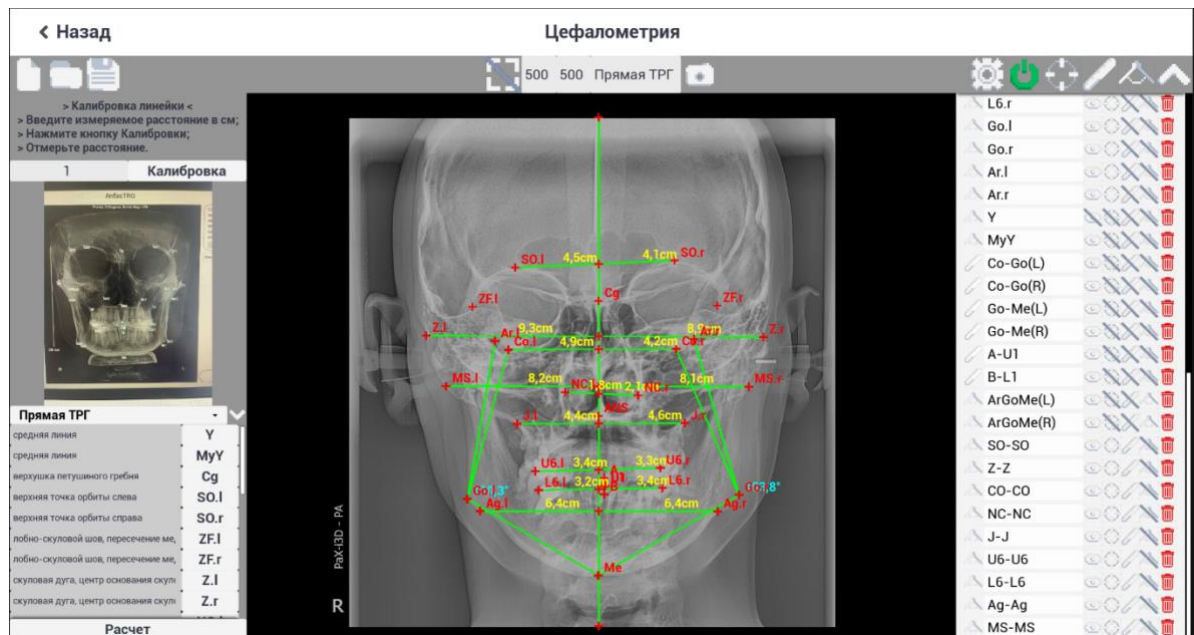


Рисунок 10 – Построение референтных плоскостей в цифровом модуле «Цефалометрия»

Одним из основных элементов являлось построение окклюзионной плоскости (OcP), проводимой через точку между режущими краями резцов и точку P6.

При анализе сагиттальных параметров программа автоматически рассчитывала угол Beta Angle, используемый для оценки сагиттального взаиморасположения челюстей.

В блоке вертикального анализа проводился расчёт угла N-S-Ba, характеризующего наклон основания черепа. Нормальным считалось значение $130 \pm 6^\circ$. При увеличении значения диагностировался ретрогнатический тип профиля, при уменьшении — прогнатический тип профиля.

Дополнительно автоматически рассчитывался суммарный угол Bjork, а также определялось соотношение задней и передней высоты лица путём измерения расстояний SGo и NMe.

В блоке линейных параметров выполнялось измерение:

- передней верхней высоты лица (N-ANS);
- передней нижней высоты лица (ANS-Gn);
- длины ветви нижней челюсти (Ar-Go);
- длины тела нижней челюсти.

Программа автоматически сопоставляла полученные значения с нормативными параметрами и формировала интерпретацию результатов.

Отдельным диагностическим блоком являлся анализ наклона резцов. Определялся угол наклона верхних резцов относительно основания черепа и окклюзионной плоскости. Дополнительно рассчитывались показатели overbite и overjet.

При анализе мягкотканых параметров программа автоматически рассчитывала: угол выпуклости мягких тканей лица; носогубный угол; положение губ относительно эстетической линии Ricketts (E-line).

После завершения этапа нанесения ориентиров программа автоматически выполняла все вычисления, определяла соответствие параметров нормативным значениям и формировала диагностическое заключение.

На следующем этапе была реализована система визуализации результатов. После выполнения расчётов программа отображала: анатомические ориентиры; линии измерений; цефалометрические плоскости; углы; линейные параметры; подписи и аннотации измерений.

Для повышения удобства работы предусматривалась возможность последовательного включения и отключения отдельных диагностических блоков.

Следующим этапом являлась разработка системы формирования отчёта. В итоговый отчёт автоматически включались: исходная телерентгенограмма; нанесённые анатомические ориентиры; результаты измерений; нормативные значения; интерпретация показателей; итоговое диагностическое заключение.

Для каждого параметра программа автоматически определяла соответствие норме по типу: «попадает в норму» или «не попадает в норму» (рисунок 11).

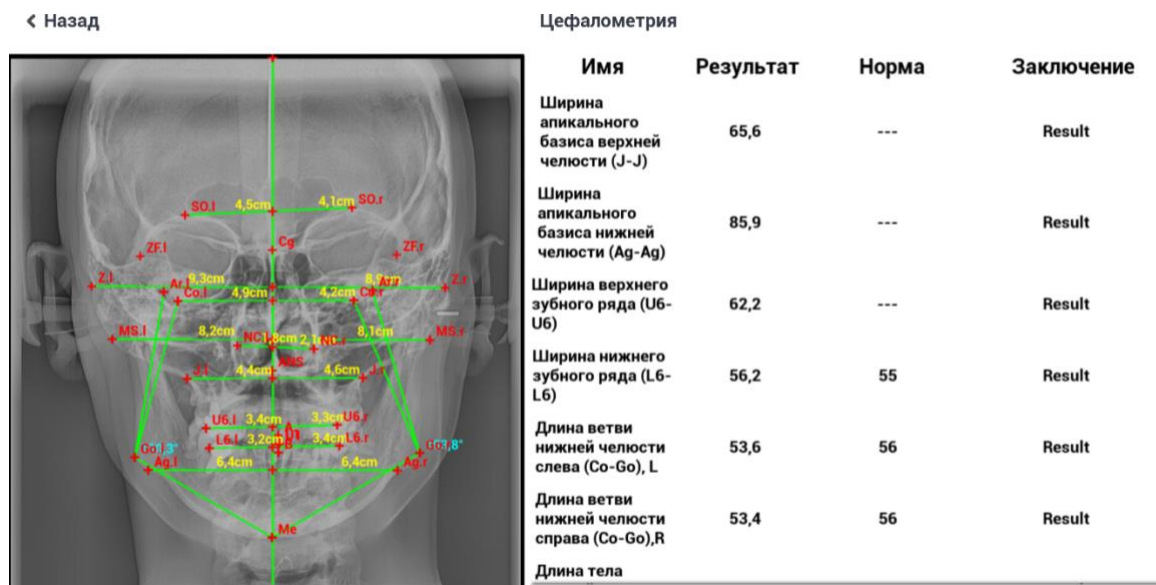


Рисунок 11 – Вывод результатов исследования в цифровом модуле программы «Цефалометрия»

Дополнительно предусматривалась возможность сохранения изображения, координат ориентиров, результатов измерений и итогового заключения в базе данных с последующим экспортом отчёта.

Таким образом, разработанный цифровой способ цефалометрического анализа представлял собой последовательный диагностический алгоритм, включающий загрузку телерентгенограммы, масштабирование изображения, нанесение анатомических ориентиров, автоматическое выполнение расчётов,

визуализацию результатов, формирование заключения и сохранение данных исследования.

2.4.3. Методика оценки диагностической эффективности цифрового способа цефалометрического анализа

После завершения разработки цифрового способа цефалометрической обработки телерентгенограмм была проведена оценка его диагностической эффективности в сравнении с классическим методом ручного трассирования рентгенограмм. Основной задачей данного этапа являлось определение точности, воспроизводимости и практической применимости разработанного цифрового способа при выполнении ортодонтической диагностики.

Исследование проводилось у тех же 60 пациентов, которые были включены в предыдущие этапы работы и соответствовали ранее описанным критериям включения и невключения. У всех пациентов имелись телерентгенограммы головы в прямой и боковой проекциях, выполненные по стандартному ортодонтическому протоколу. Анализ проводился той же экспертной группой, включавшей трёх врачей-ортодонтотв с действующим сертификатом по специальности «Ортодонтия» и стажем практической работы более 10 лет.

Для каждого пациента выполнялись два варианта цефалометрического анализа — традиционный ручной и цифровой. При классическом подходе исследователи проводили ручное трассирование телерентгенограмм с нанесением анатомических ориентиров, построением референтных линий и плоскостей, а также последующим выполнением линейных и угловых измерений. Измерения осуществлялись с использованием транспортира, линейки и стандартных методик цефалометрического анализа (рисунок 12).

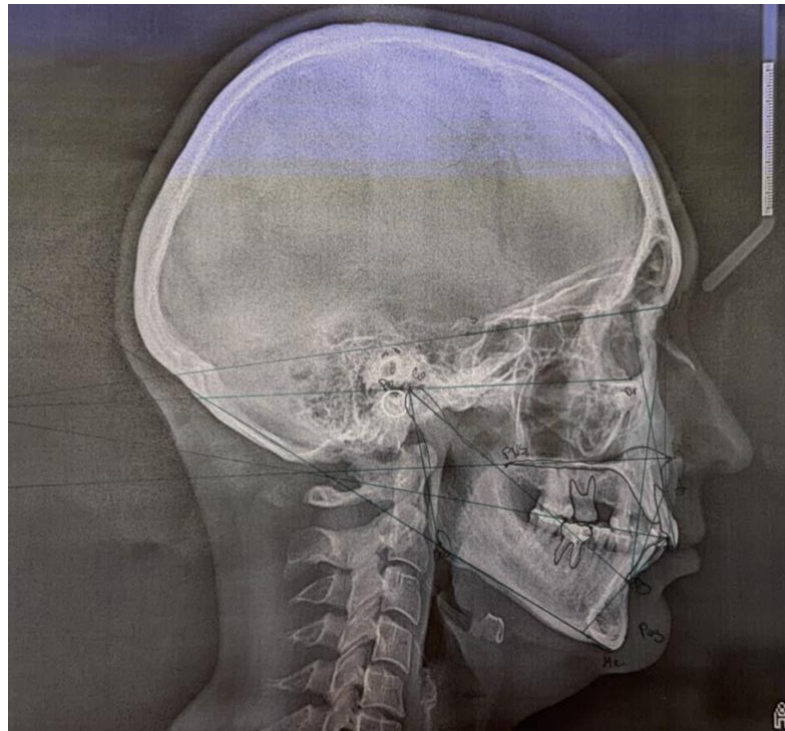


Рисунок 12 – Мануальный расчет боковой ТРГ

При цифровом способе исследования телерентгенограмма загружалась в разработанный модуль, после чего врач наносил анатомические ориентиры непосредственно на изображение. После завершения этапа разметки программа автоматически выполняла все необходимые расчёты, сопоставляла полученные показатели с нормативными значениями и формировала итоговое диагностическое заключение.

Поскольку целью исследования являлось сравнение двух способов анализа одних и тех же диагностических данных, разделение пациентов на отдельные группы не проводилось. Каждый пациент одновременно являлся объектом исследования как для традиционного ручного анализа, так и для цифровой цефалометрии.

Для минимизации влияния случайной ошибки все измерения проводились тремя независимыми специалистами экспертной группы. Каждый исследователь выполнял анализ самостоятельно и не имел доступа к результатам других специалистов. Кроме того, каждый параметр определялся трижды с последующим расчётом среднего значения. Повторный анализ части телерентгенограмм проводился через 10–14 дней без доступа к предыдущим

результатам измерений, что позволяло объективно оценить внутриоператорскую и межоператорскую воспроизводимость результатов.

Общий объём исследования рассчитывался с учётом количества пациентов, числа сравниваемых методов, количества исследователей и числа повторных измерений:

$$N = n \times m \times e \times r$$

где:

n — количество пациентов;

m — количество методов исследования;

e — количество исследователей;

r — количество повторных измерений.

В настоящем исследовании общий объём измерительных циклов составил:

$$N = 60 \times 2 \times 3 \times 3 = 1080$$

Таким образом, было выполнено 1080 измерительных циклов, что обеспечивало достаточный объём данных для оценки точности и воспроизводимости разработанного цифрового способа.

Для каждого параметра рассчитывалось среднее значение трёх последовательных измерений:

$$X_{avg} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}$$

где:

X_1, X_2, X_3 — результаты трёх последовательных измерений.

Например, если при определении угла ANB были получены значения 4°, 5° и 4°, итоговое среднее значение составляло:

$$X_{avg} = \frac{4 + 5 + 4}{3} = 4,33^\circ$$

Именно среднее значение использовалось при дальнейшем статистическом анализе.

Оценка диагностической эффективности цифрового способа проводилась комплексно и включала анализ точности измерений, воспроизводимости

результатов, стабильности измерений, временной эффективности, совпадения диагностических заключений и практического удобства применения метода.

Первым этапом выполнялась оценка точности измерений. Для этого результаты цифрового анализа сопоставлялись с результатами традиционной ручной цефалометрии. Сравнение проводилось по основным цефалометрическим параметрам, наиболее часто используемым в ортодонтической практике.

В анализ включались сагиттальные параметры — углы SNA, SNB, ANB и Beta Angle, вертикальные показатели — угол N-S-Ba и суммарный угол Bjork, линейные параметры — передняя верхняя и нижняя высота лица, длина ветви и тела нижней челюсти, а также показатели положения резцов, overbite, overjet и мягкотканые параметры лица.

Для оценки точности рассчитывалась абсолютная ошибка измерения:

$$\Delta = | X_d - X_m |$$

где:

X_d — значение параметра при цифровом анализе;

X_m — значение параметра при ручном анализе.

Например, если при ручной цефалометрии угол SNB составлял 78° , а при цифровом анализе — $78,4^\circ$, абсолютная ошибка определялась следующим образом:

$$\Delta = | 78,4 - 78 | = 0,4^\circ$$

Дополнительно рассчитывали относительную ошибку:

$$\delta = \frac{| X_d - X_m |}{X_m} \times 100\%$$

В приведенном примере:

$$\delta = \frac{0,4}{78} \times 100 = 0,51\%$$

Небольшие значения абсолютной и относительной ошибки свидетельствовали о высокой точности цифрового метода.

Следующим этапом проводили оценку воспроизводимости результатов. Основное внимание уделяли стабильности измерений при повторных исследованиях и степени совпадения данных, полученных разными специалистами.

Главным статистическим показателем воспроизводимости служил коэффициент внутриклассовой корреляции (ICC). Значения ICC выше 0,90 расценивали как отличную воспроизводимость, показатели от 0,75 до 0,90 — как хорошие, а значения ниже 0,75 — как недостаточные.

Например, если при цифровом определении угла ANB коэффициент ICC составлял 0,96, результат считали высоко воспроизводимым.

Для дополнительной оценки стабильности измерений рассчитывалась ошибка метода по формуле Дальберга:

$$ME = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

где:

d — разница между повторными измерениями;
 n — количество повторных измерений.

Например, если различия между повторными измерениями составляли 0,5°, 0,3°, 0,4°, 0,2° и 0,4°, расчёт выполнялся следующим образом:

$$ME = \sqrt{\frac{0,25 + 0,09 + 0,16 + 0,04 + 0,16}{10}}$$

$$ME = \sqrt{0,07} = 0,26^\circ$$

Чем меньше была ошибка метода, тем выше считалась стабильность измерений. Для дополнительной оценки вариабельности результатов рассчитывался коэффициент вариации:

$$CV = \frac{SD}{M} \times 100\%$$

где:

SD — стандартное отклонение;

M — среднее значение показателя.

Например, при среднем значении угла ANB $4,5^\circ$ и стандартном отклонении $0,3^\circ$:

$$CV = \frac{0,3}{4,5} \times 100 = 6,7\%$$

Низкие значения коэффициента вариации свидетельствовали о высокой стабильности цифровых измерений.

Для оценки согласованности результатов цифрового и ручного анализа применялся метод Bland–Altman. Для каждого параметра рассчитывались среднее значение двух методов и разница между ними.

Среднее значение определялось по формуле:

$$M = \frac{X_d + X_m}{2}$$

Разница между методами рассчитывалась следующим образом:

$$D = X_d - X_m$$

Например, если угол SNA при ручном анализе составлял 82° , а при цифровом — $82,5^\circ$:

$$M = \frac{82 + 82,5}{2} = 82,25^\circ$$

$$D = 82,5 - 82 = 0,5^\circ$$

Минимальная величина расхождения и отсутствие систематического смещения результатов расценивались как показатель высокой согласованности методов.

Отдельным критерием эффективности являлась временная эффективность исследования. При ручной цефалометрии основное время уходило на трассировку телерентгенограммы, построение плоскостей и линий, выполнение измерений и последующих расчетов вручную. При цифровом анализе большая часть работы была связана только с нанесением анатомических ориентиров, тогда как вычисления и формирование итогового заключения программа выполняла автоматически.

Для каждого исследования фиксировали полное время анализа — от открытия изображения до получения готового диагностического заключения.

Среднее время исследования рассчитывали по формуле:

$$T_{avg} = \frac{\sum T}{n}$$

где:

T — время одного исследования;

n — количество исследований.

Процент сокращения времени определяли по формуле:

$$E_t = \frac{T_m - T_d}{T_m} \times 100\%$$

где:

T_m — продолжительность ручного анализа;

T_d — время цифрового анализа.

Например, если ручная цефалометрия занимала 50 минут, а цифровой анализ — 14 минут:

$$E_t = \frac{50 - 14}{50} \times 100 = 72\%$$

Полученный результат указывал на существенное сокращение времени исследования при использовании цифрового метода.

Дополнительно сравнивали диагностические заключения, полученные при цифровом и традиционном способах анализа.

Сравнивались выводы относительно типа скелетного соотношения, типа роста лицевого скелета, положения резцов, выраженности вертикальных нарушений, мягкотканного профиля и положения губ относительно эстетической линии.

Процент совпадения рассчитывался по формуле:

$$C = \frac{N_c}{N} \times 100\%$$

где:

N_c — количество совпадающих заключений;

N — общее число заключений.

Например, если из 60 диагностических заключений совпали 57:

$$C = \frac{57}{60} \times 100 = 95\%$$

Высокий процент совпадения свидетельствовал о сопоставимой диагностической информативности цифрового и традиционного методов анализа.

После завершения исследования специалисты экспертной группы дополнительно оценивали практическое удобство разработанного цифрового способа. Оценивались удобство нанесения ориентиров, скорость работы, наглядность визуализации результатов, удобство хранения данных, возможность повторного анализа и качество формирования итогового отчёта. Каждый показатель оценивался по пятибалльной шкале.

Средняя экспертная оценка рассчитывалась по формуле:

$$S = \frac{\sum x}{n}$$

где:

x — оценка каждого эксперта;

n — количество экспертов.

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием программ Microsoft Excel и Statistica. Для каждого параметра рассчитывались среднее значение, стандартное отклонение, медиана, минимальные и максимальные значения. Нормальность распределения данных проверялась критерием Шапиро–Уилка.

При нормальном распределении данных для сравнения результатов цифрового и ручного анализа применялся t-критерий Стьюдента для связанных выборок. При распределении, отличном от нормального, использовался критерий Уилкоксона. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Диагностическая эффективность цифрового способа цефалометрического анализа считалась подтверждённой при отсутствии статистически значимых различий между цифровыми и ручными измерениями, минимальной ошибке измерений, высоком коэффициенте внутриклассовой корреляции, низкой ошибке метода по Дальбергу, высокой межоператорской воспроизводимости, значительном сокращении времени исследования, высоком проценте совпадения диагностических заключений и высокой экспертной оценке удобства применения метода.

Таким образом, оценка эффективности разработанного цифрового способа цефалометрического анализа основывалась не только на сопоставлении отдельных измерений, но и на комплексной оценке точности, стабильности результатов, воспроизводимости, временной эффективности и практической применимости метода в клинической ортодонтической практике.

2.5. Материал и метод разработки цифрового способа анализа компьютерной томографии

Следующим этапом работы стала разработка цифрового метода анализа данных конусно-лучевой компьютерной томографии и оценка его возможностей при ортодонтическом планировании. Этот этап рассматривали отдельно, поскольку КЛКТ позволяет получать информацию, которая недоступна или ограничена при использовании двухмерных методов диагностики. Речь идет о пространственном положении зубов, состоянии костных структур, толщине кортикальной пластинки, особенностях альвеолярной кости, положении головок нижней челюсти и состоянии височно-нижнечелюстного сустава.

Разработка данного метода была обусловлена тем, что в современной ортодонтической практике КЛКТ всё чаще применяется не только как дополнительный способ визуализации, но и как инструмент для уточнения диагноза, определения безопасных границ перемещения зубов и оценки

анатомических структур, имеющих функциональное значение. Наибольшее внимание уделяли двум направлениям: анализу положения головок нижней челюсти в суставных ямках для выявления признаков патологии ВНЧС и измерению толщины кортикальной кости в области альвеолярного отростка верхней челюсти и альвеолярной части нижней челюсти.

Именно эти показатели были определены как ключевые при разработке цифрового КТ-модуля.

Разработка цифрового способа анализа компьютерной томографии проводилась в два последовательных этапа. На первом этапе создавался сам цифровой инструмент: определялись форматы загружаемых данных, режимы просмотра, способы визуализации, измерительные функции и структура итогового отчёта. На втором этапе проводилась оценка диагностической эффективности разработанного способа, то есть определялось, насколько цифровой анализ КЛКТ повышает точность ортодонтической диагностики по сравнению с традиционной оценкой диагностических данных без специализированного цифрового анализа томографических срезов.

2.5.1. Материал для разработки цифрового способа анализа компьютерной томографии

Материалом для разработки цифрового способа служили данные конусно-лучевой компьютерной томографии пациентов, проходивших ортодонтическое обследование и планирование лечения. Исследования использовались в формате DICOM, что позволяло сохранять исходную пространственную информацию, толщину среза, ориентацию изображения и метрические характеристики томографического исследования.

В разработанном модуле была предусмотрена поддержка различных вариантов загрузки DICOM-данных: DICOMDIR, одиночных файлов и массивов файлов, расположенных в папке. Такой подход был необходим, поскольку в клинической практике данные КЛКТ могут поступать из разных томографических систем и иметь различную структуру хранения. Для

обработки DICOM-файлов была предусмотрена интеграция библиотеки VTK, обеспечивающей корректную работу с медицинскими изображениями, реконструкцию срезов и визуализацию объёмных данных.

Основной задачей при разработке метода являлось создание цифрового инструмента, позволяющего врачу загружать данные КЛКТ, просматривать их в различных плоскостях, выполнять линейные и угловые измерения, оценивать положение анатомических структур и сохранять результаты исследования в виде диагностического отчёта.

Техническая реализация цифрового способа предусматривала работу с томографическими данными в трёх ортогональных плоскостях: сагиттальной, корональной и аксиальной. Дополнительно был предусмотрен режим объёмной визуализации, позволяющий врачу оценивать пространственное расположение костных структур и зубов в формате Volume Rendering. Для повышения диагностической информативности были включены настройки окна и уровня изображения, а также режимы визуализации MIP, MinIP и Average Projection. Эти функции были необходимы для адаптации изображения под конкретную диагностическую задачу: оценку кортикальной пластинки, суставной головки, альвеолярной кости, положения корней зубов или пространственных взаимоотношений челюстей.

В качестве программной среды была выбрана Unreal Engine 5 с использованием C++ и/или Blueprints. Для работы с DICOM-данными и построения 2D- и 3D-визуализации была предусмотрена библиотека VTK. Архитектура модуля включала обработчик томографических данных, систему 2D- и 3D-визуализации, интерфейс загрузки файлов, окно просмотра с инструментами анализа и панель управления визуальными параметрами.

2.5.2. Методика разработки цифрового способа анализа компьютерной томографии

Разработка цифрового способа анализа компьютерной томографии проводилась поэтапно.

На первом этапе был создан механизм загрузки DICOM-данных. После выбора исследования программа считывала структуру файлов, определяла параметры томографического набора, формировала серию срезов и отображала исследование в рабочем окне. Особое внимание уделялось тому, чтобы при загрузке не нарушались исходные метрические параметры изображения, поскольку любые искажения могли повлиять на точность последующих измерений.

На втором этапе была реализована система просмотра данных в трёх плоскостях. Врач получал возможность последовательно анализировать сагиттальные, корональные и аксиальные срезы, перемещаться по томографическому объёму, изменять масштаб изображения и выбирать наиболее информативный срез для проведения измерений. При скроллинге срезов программа сохраняла корректное положение линий и измерительных ориентиров, что было принципиально важно для исключения смещения анатомических структур и ошибок при повторной оценке (рисунок 13).

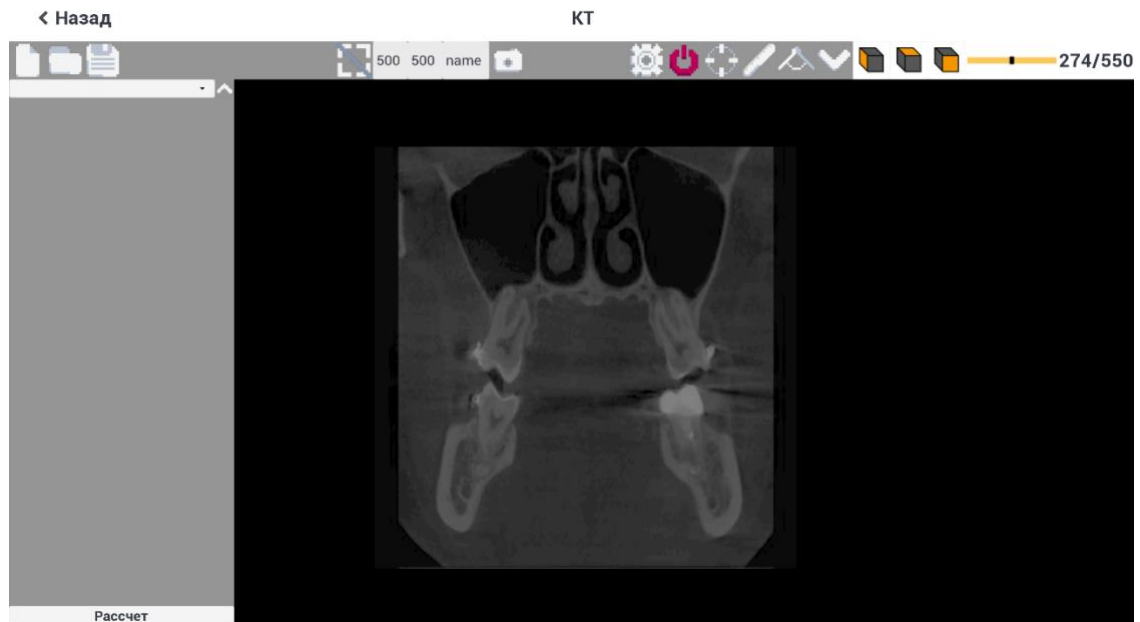


Рисунок 13 – Интерфейс модуля просмотра КЛКТ

На третьем этапе был реализован режим трёхмерной визуализации. Объёмное представление данных использовалось не как замена посрезовому анализу, а как дополнительный инструмент пространственного понимания

анатомии пациента. Оно позволяло оценивать общую конфигурацию челюстей, положение зубов, выраженность асимметрии, взаимоотношение корней зубов с кортикальными пластинками и особенности строения суставных структур.

На четвёртом этапе были разработаны измерительные инструменты. В модуль были включены цифровая линейка, транспортир, система визуальных меток и аннотаций. Пользователь мог выполнять линейные измерения между выбранными точками, определять углы, наносить диагностические метки на интересующие анатомические зоны и сохранять результаты измерений. При изменении масштаба или перемещении изображения геометрические параметры измерений сохранялись, поэтому увеличение или смещение изображения не влияло на полученные результаты (рисунок 14).

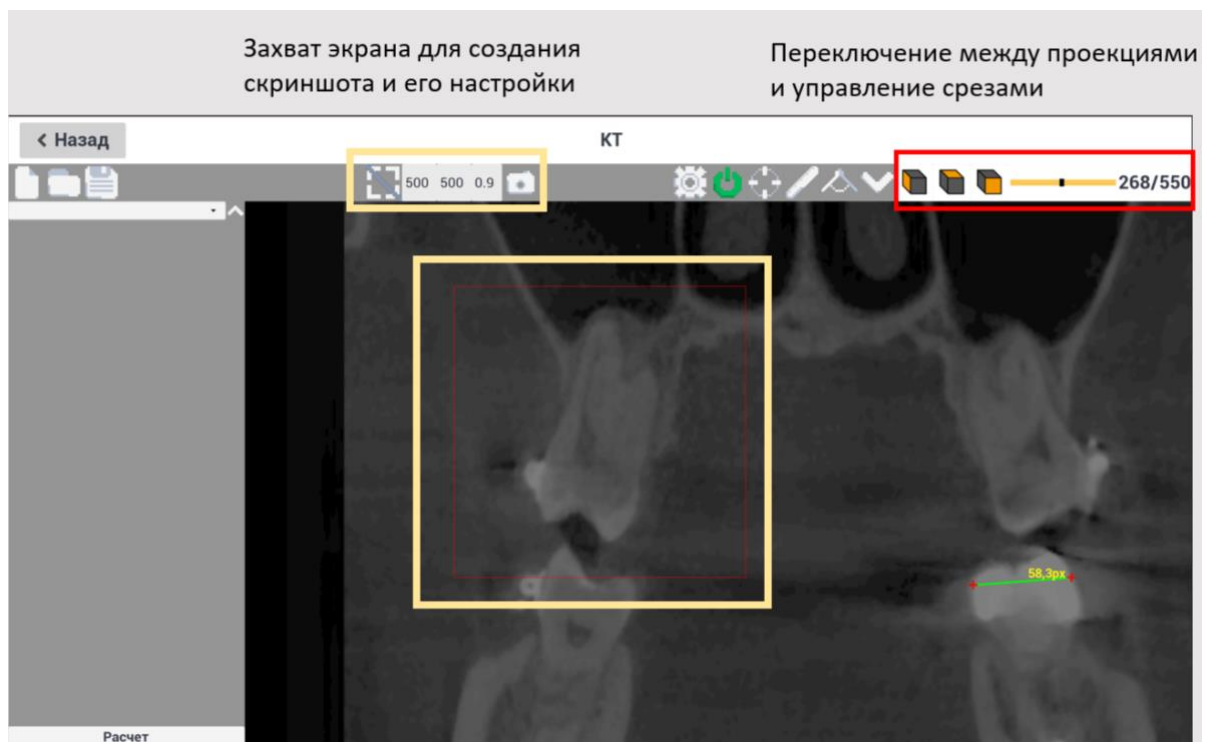
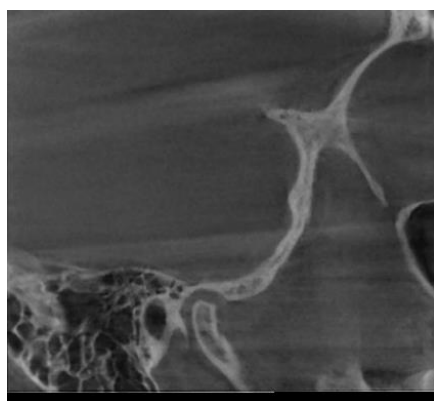


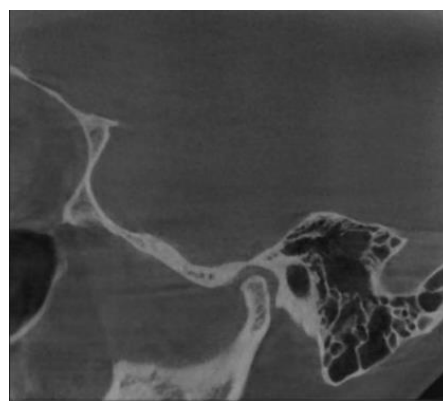
Рисунок 14 – Измерительные инструменты модуля просмотра КЛКТ

Отдельный раздел модуля был посвящен оценке положения головок нижней челюсти. Анализ выполняли на сагиттальных и корональных срезах в области ВНЧС. Во время исследования определяли расположение суставной головки в суставной ямке, сравнивали правый и левый суставы, оценивали

размеры переднего, заднего и верхнего суставных пространств, а также выявляли возможную асимметрию или смещение головки. Этот этап имел особое значение при ортодонтическом планировании у пациентов с дистальной окклюзией, асимметрией лица, жалобами на дискомфорт в области ВНЧС и в случаях, когда лечение предполагало изменение положения нижней челюсти (рисунок 15).



А



Б

Рисунок 15 – КЛКТ ВНЧС автоматически сформированный срез в цифровом модуле разработанной программы «КЛКТ»

Вторым важным направлением исследования стала оценка толщины кортикальной кости. Измерения проводили в области альвеолярного отростка верхней челюсти и альвеолярной части нижней челюсти на срезах, расположенных перпендикулярно длинной оси зуба или исследуемому участку костной пластинки. Отдельно измеряли толщину вестибулярной и оральной кортикальной пластинки как во фронтальном, так и в боковых отделах зубных рядов. Полученные данные использовали для определения допустимых границ ортодонтического перемещения зубов, поскольку при недостаточной толщине кортикальной кости возрастает риск выхода корня за пределы альвеолярной кости, развития дегисценций, фенестраций и рецессии десны (рисунок 16).

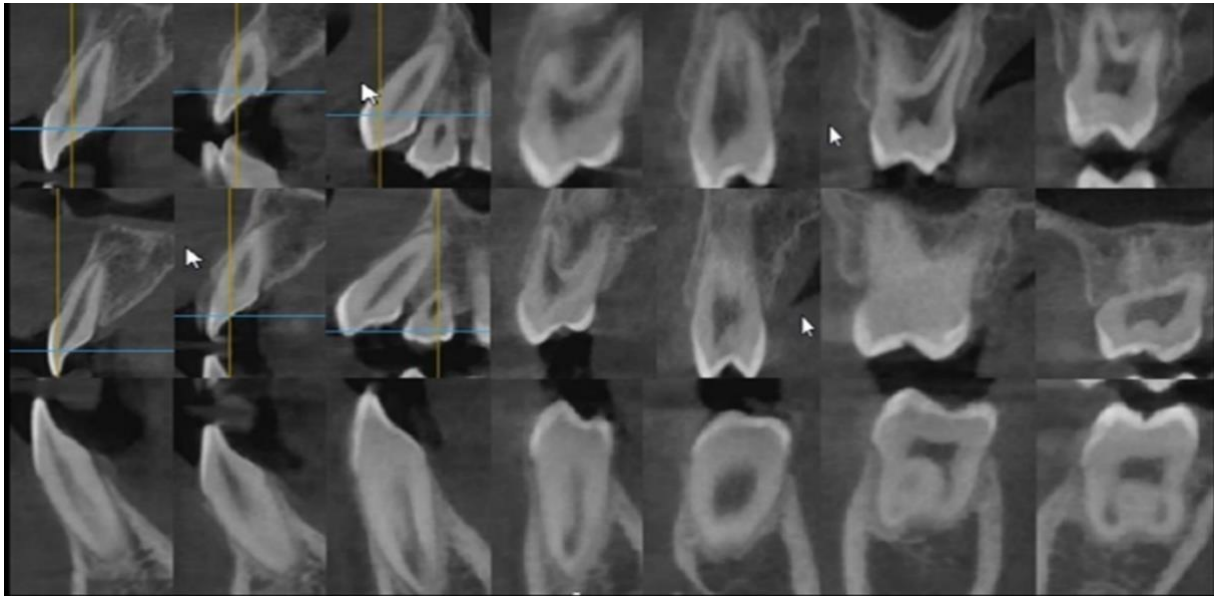


Рисунок 16 – Автоматизированная выгрузка срезов зубов в цифровом модуле разработанной программы «КЛКТ»

На пятом этапе была создана система визуализации результатов. После завершения измерений программа отображала на срезах все нанесённые линии, углы, метки и числовые показатели. При необходимости врач мог скрывать или включать отдельные элементы, чтобы сосредоточиться на анализе конкретной области без перегруженности изображения.

На шестом этапе реализовали автоматическое формирование отчёта. В него включались исходные данные исследования, выбранные срезы, результаты измерений, комментарии, показатели толщины кортикальной кости, параметры положения головок нижней челюсти и итоговое диагностическое заключение. Полученные данные можно было экспортировать в медицинскую карту стоматологического пациента и использовать при обсуждении и визуализации плана лечения.

Заключительным этапом стало тестирование и последующая оптимизация работы модуля.

Оценивалась корректность загрузки DICOM-файлов, стабильность отображения данных, работа измерительных инструментов, точность сохранения аннотаций, производительность при обработке больших объёмов данных и удобство пользовательского интерфейса. По итогам тестирования

был сформирован рабочий цифровой модуль, позволяющий загружать и просматривать DICOM-данные в различных режимах и выполнять необходимые диагностические измерения.

Таким образом, разработанный цифровой способ анализа компьютерной томографии представлял собой последовательный диагностический алгоритм: загрузка DICOM-данных, отображение томографического исследования в трёх плоскостях, выбор диагностически значимых срезов, проведение линейных и угловых измерений, оценка положения головок нижней челюсти, измерение толщины кортикальной кости, визуализация результатов, сохранение данных и формирование итогового отчёта.

2.5.3. Методика оценки диагностической эффективности цифрового способа анализа компьютерной томографии

После завершения разработки цифрового способа анализа компьютерной томографии была проведена оценка его диагностических возможностей при ортодонтическом планировании. В отличие от предыдущих этапов, где цифровые методы сравнивались с полностью аналоговыми измерениями, в данном разделе оценивался вклад цифрового КТ-анализа в повышение точности диагностики по сравнению с традиционным ортодонтическим планированием, основанным на клиническом осмотре, фотографиях, биометрии зубных рядов и цефалометрии без специализированного трёхмерного анализа КЛКТ.

Исследование проводилось у тех же 60 пациентов, которые были включены в предыдущие этапы работы и соответствовали ранее описанным критериям включения и невключения. Анализ выполнялся той же экспертной группой, состоявшей из трёх врачей-ортодонт с действующим сертификатом или аккредитацией по специальности «Ортодонтия» и стажем практической работы не менее 10 лет. Такой подход позволял сохранить единые условия оценки и сопоставимость результатов между всеми диагностическими модулями.

Для каждого пациента выполнялись два варианта диагностической оценки. Первый вариант включал традиционный комплекс ортодонтического обследования без углублённого цифрового анализа КЛКТ. Врач анализировал клинические данные, фотографии, телерентгенограммы, биометрические показатели и стандартные рентгенологические сведения. Второй вариант включал тот же комплекс данных, но дополнялся цифровым анализом КЛКТ с оценкой трёхмерных анатомических параметров, положения головок нижней челюсти и толщины кортикальной кости.

Такой дизайн исследования позволял определить не только точность измерений внутри КТ-модуля, но и его реальный диагностический вклад в ортодонтическое планирование. Иными словами, оценивалось, изменяется ли полнота диагностики после включения в протокол трёхмерного анализа костных и суставных структур.

Все измерения выполнялись тремя независимыми специалистами экспертной группы. Каждый исследователь проводил анализ самостоятельно и не имел доступа к результатам других специалистов. Для уменьшения влияния случайной ошибки каждый измеряемый параметр определялся трижды, после чего рассчитывалось среднее значение трёх последовательных измерений. Повторный анализ части КЛКТ-исследований выполнялся через 10–14 дней без доступа к первичным результатам, что позволяло оценить внутриоператорскую и межоператорскую воспроизводимость.

Общее количество измерительных циклов рассчитывалось по формуле:

$$N = n \times m \times e \times r$$

где n — количество пациентов, m — количество сравниваемых вариантов диагностики, e — количество экспертов, r — количество повторных измерений.

В настоящем исследовании:

$$N = 60 \times 2 \times 3 \times 3 = 1080$$

Таким образом, общий объём измерительных циклов составил 1080, что обеспечивало достаточный массив данных для оценки точности, воспроизводимости и клинического вклада цифрового анализа компьютерной томографии.

Для каждого параметра рассчитывалось среднее значение трёх последовательных измерений:

$$X_{avg} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}$$

где X_1 , X_2 , X_3 — результаты трёх последовательных измерений.

Например, если при измерении толщины вестибулярной кортикальной пластинки в области нижнего резца были получены значения 0,9 мм, 1,0 мм и 0,9 мм, итоговое среднее значение составляло:

$$X_{avg} = \frac{0,9 + 1,0 + 0,9}{3} = 0,93 \text{ мм}$$

Именно это среднее значение использовалось при последующем сравнительном и статистическом анализе.

Оценка диагностической эффективности цифрового анализа КЛКТ проводилась по нескольким направлениям: точность и воспроизводимость линейных измерений, согласованность результатов между экспертами, выявляемость дополнительных диагностически значимых признаков, влияние КЛКТ-анализа на планирование лечения, временная эффективность и практическое удобство использования модуля.

Первым критерием являлась точность линейных измерений. Она определялась по результатам повторного измерения одних и тех же анатомических структур на КЛКТ-срезах. Оценивались толщина вестибулярной и оральной кортикальной пластинки, ширина альвеолярной кости в области фронтальных и боковых зубов, расстояние от корня зуба до кортикальной пластинки, переднее, верхнее и заднее суставные пространства ВНЧС, а также симметричность положения правой и левой суставных головок.

Абсолютная ошибка измерения рассчитывалась по формуле:

$$\Delta = | X_1 - X_2 |$$

где X_1 — первое измерение параметра, X_2 — повторное измерение того же параметра.

Например, если при первом измерении толщина кортикальной пластинки составила 1,2 мм, а при повторном измерении — 1,3 мм, абсолютная ошибка составляла:

$$\Delta = | 1,2 - 1,3 | = 0,1 \text{ мм}$$

Дополнительно рассчитывалась относительная ошибка:

$$\delta = \frac{| X_1 - X_2 |}{X_1} \times 100\%$$

В приведённом примере:

$$\delta = \frac{0,1}{1,2} \times 100 = 8,3\%$$

Для очень малых линейных величин, характерных для кортикальной пластинки, относительная ошибка могла быть выше, чем при измерении крупных анатомических структур, поэтому основное значение при интерпретации придавалось абсолютной ошибке в миллиметрах.

Вторым критерием являлась воспроизводимость измерений. Она оценивалась отдельно для повторных измерений одним и тем же специалистом и для измерений, выполненных разными экспертами. Основным статистическим показателем являлся коэффициент внутриклассовой корреляции. Значения ICC более 0,90 расценивались как отличная воспроизводимость, значения от 0,75 до 0,90 — как хорошая воспроизводимость, а значения менее 0,75 — как недостаточная воспроизводимость.

Например, если при измерении толщины кортикальной кости в области резцов нижней челюсти значение ICC составляло 0,94, результат расценивался как высоко воспроизводимый.

Для дополнительной оценки стабильности измерений рассчитывалась ошибка метода по формуле Дальберга:

$$ME = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

где d — разница между первым и повторным измерением, n — количество повторных измерений.

Например, если различия между повторными измерениями толщины кортикальной пластинки составили 0,1 мм, 0,2 мм, 0,1 мм, 0,1 мм и 0,2 мм, расчёт выполнялся следующим образом:

$$ME = \sqrt{\frac{0,01 + 0,04 + 0,01 + 0,01 + 0,04}{2 \times 5}}$$

$$ME = \sqrt{\frac{0,11}{10}} = \sqrt{0,011} = 0,10 \text{ мм}$$

Низкое значение ошибки метода указывало на стабильность измерений и возможность использования цифрового анализа КЛКТ для оценки малых анатомических величин.

Дополнительно рассчитывался коэффициент вариации:

$$CV = \frac{SD}{M} \times 100\%$$

где SD — стандартное отклонение, M — среднее значение показателя.

Например, если средняя толщина кортикальной пластинки составляла 1,2 мм, а стандартное отклонение повторных измерений — 0,08 мм, коэффициент вариации рассчитывали следующим образом:

$$CV = \frac{0,08}{1,2} \times 100 = 6,7\%$$

Низкий коэффициент вариации указывал на хорошую стабильность повторных измерений.

Для оценки согласованности результатов между экспертами использовали метод Bland–Altman. Для каждого параметра определяли среднее значение двух измерений и разницу между ними:

$$M = \frac{X_1 + X_2}{2}$$

$$D = X_1 - X_2$$

Например, если один специалист определил толщину кортикальной пластинки как 1,2 мм, а второй — как 1,3 мм, расчёты выглядели следующим образом:

$$M = \frac{1,2 + 1,3}{2} = 1,25 \text{ мм}$$

$$D = 1,2 - 1,3 = -0,1 \text{ мм}$$

Небольшое среднее смещение и отсутствие выраженного разброса между измерениями расценивали как показатель высокой согласованности результатов.

Отдельно оценивали диагностическую выявляемость дополнительных признаков. Для этого сравнивали количество клинически значимых изменений, обнаруженных при стандартном обследовании, с числом дополнительных находок, выявленных после цифрового анализа КЛКТ.

К таким признакам относили уменьшение толщины кортикальной пластинки, близкое расположение корней зубов к наружной или внутренней кортикальной пластинке, асимметрию положения суставных головок, сужение суставного пространства, признаки неблагоприятного положения зубов относительно альвеолярной кости и костные ограничения для планируемого перемещения зубов.

Доля дополнительных диагностических признаков рассчитывалась по формуле:

$$D_{add} = \frac{N_{add}}{N_{all}} \times 100\%$$

где N_{add} — количество дополнительных признаков, выявленных только после КЛКТ-анализа, N_{all} — общее количество выявленных диагностически значимых признаков.

Например, если всего у пациентов было выявлено 120 диагностически значимых признаков, из которых 42 были установлены только после анализа КЛКТ, доля дополнительных признаков составляла:

$$D_{add} = \frac{42}{120} \times 100 = 35,0\%$$

Этот показатель отражал вклад цифрового анализа КЛКТ в расширение диагностической информации.

Следующим критерием являлось влияние КЛКТ-анализа на планирование лечения. После выполнения стандартной диагностики врач формировал предварительный план ортодонтического лечения. Затем после анализа КЛКТ тот же эксперт оценивал, требуется ли уточнение или изменение плана. Учитывались случаи изменения направления перемещения зубов, ограничения объёма перемещения, отказа от чрезмерной протрузии или ретрузии резцов, изменения тактики работы с нижней челюстью, необходимости учёта положения суставной головки и выявления факторов риска со стороны костной ткани.

Частота изменения или уточнения плана рассчитывалась по формуле:

$$P_{change} = \frac{N_{change}}{N} \times 100\%$$

где N_{change} — количество случаев, в которых после анализа КЛКТ план лечения был уточнён или изменён, N — общее количество пациентов.

Например, если из 60 пациентов после цифрового анализа КЛКТ план лечения был уточнён у 24 пациентов, показатель составлял:

$$P_{change} = \frac{24}{60} \times 100 = 40,0\%$$

Данный показатель использовался для оценки клинического вклада КЛКТ-модуля в ортодонтическое планирование.

Дополнительно оценивалось совпадение диагностических заключений между экспертами. Сравнивались заключения по наличию или отсутствию костных ограничений, асимметрии суставных головок, признаков

неблагоприятного положения головки нижней челюсти, риска выхода корня за пределы альвеолярной кости и необходимости коррекции ортодонтического плана.

Процент совпадения заключений рассчитывался по формуле:

$$C = \frac{N_c}{N} \times 100\%$$

где N_c — количество совпадающих заключений, N — общее число заключений.

Например, если по признаку недостаточной толщины кортикальной кости заключения экспертов совпали в 56 из 60 случаев:

$$C = \frac{56}{60} \times 100 = 93,3\%$$

Высокий процент совпадения свидетельствовал о хорошей диагностической воспроизводимости цифрового анализа КЛКТ.

Временная эффективность оценивалась по времени, необходимому для выполнения полного анализа одного КЛКТ-исследования. Отсчёт времени начинался с момента загрузки DICOM-данных и завершался после формирования итогового диагностического заключения. Отдельно фиксировалось время загрузки исследования, выбора диагностических срезов, выполнения измерений, анализа ВНЧС, оценки толщины кортикальной кости и формирования отчёта.

Среднее время анализа рассчитывалось по формуле:

$$T_{avg} = \frac{\sum T}{n}$$

где T — время анализа одного исследования, n — количество пациентов.

Например, если цифровой анализ пяти КЛКТ-исследований занимал 16, 18, 17, 19 и 18 минут, среднее время рассчитывали следующим образом:

$$T_{avg} = \frac{16 + 18 + 17 + 19 + 18}{5} = 17,6 \text{ мин}$$

Для оценки эффективности цифрового модуля дополнительно определяли сокращение времени по сравнению с обычным просмотром КЛКТ в

стандартном DICOM-просмотрщике без структурированного протокола измерений:

$$E_t = \frac{T_s - T_d}{T_s} \times 100\%$$

где T_s — время стандартного просмотра и ручной регистрации результатов, T_d — время цифрового структурированного анализа.

Например, если стандартный просмотр занимал 35 минут, а цифровой анализ — 18 минут:

$$E_t = \frac{35 - 18}{35} \times 100 = 48,6\%$$

После завершения исследования специалисты экспертной группы дополнительно оценивали удобство использования цифрового метода анализа КЛКТ. Учитывали удобство загрузки DICOM-данных, скорость переключения между плоскостями исследования, качество визуализации, удобство измерительных инструментов, возможности оценки ВНЧС, удобство измерения толщины кортикальной кости, сохранения результатов и формирования итогового отчета. Каждый параметр оценивали по пятибалльной шкале: от 1 балла — минимальный уровень удобства, до 5 баллов — максимальный.

Средняя экспертная оценка рассчитывалась по формуле:

$$S = \frac{\sum x}{n}$$

где x — оценка каждого эксперта, n — количество экспертов.

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием программ Microsoft Excel и Statistica. Для количественных параметров рассчитывались среднее значение, стандартное отклонение, медиана, минимальные и максимальные значения. Нормальность распределения проверялась критерием Шапиро–Уилка. При нормальном распределении данных применялся t-критерий Стьюдента для связанных выборок, при распределении, отличном от нормального, использовался критерий

Уилкоксона. Согласованность результатов оценивалась по коэффициенту внутриклассовой корреляции и анализу Bland–Altman. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Диагностическая эффективность цифрового способа анализа компьютерной томографии считалась подтверждённой при высокой воспроизводимости измерений, низкой ошибке метода, высокой межоператорской согласованности, увеличении числа выявляемых диагностически значимых признаков, статистически значимом повышении полноты диагностического заключения, сокращении времени анализа и высокой экспертной оценке удобства применения метода.

Таким образом, оценка эффективности разработанного цифрового способа анализа компьютерной томографии была построена не только на проверке точности линейных измерений, но и на определении его реального диагностического вклада в ортодонтическое планирование. Такой подход позволял оценить, насколько цифровой анализ КЛКТ помогает выявлять костные и суставные ограничения, уточнять план лечения и повышать безопасность ортодонтических перемещений.

2.6. Материал и метод разработки способа ортодонтического лечения дистальной окклюзии с применением позиционирующих окклюзионных накладок и конструкционного материала для их аддитивного производства

2.6.1. Материал и метод разработки способа ортодонтического лечения дистальной окклюзии с применением позиционирующих окклюзионных накладок

Одним из заключительных этапов исследования стала разработка способа ортодонтического лечения дистальной окклюзии зубных рядов с применением позиционирующих окклюзионных накладок, изготовленных с использованием цифровых технологий. Необходимость создания данного

способа была связана с тем, что при лечении пациентов с дистальной окклюзией ортодонтическое перемещение зубов в большинстве случаев выполняется в привычном для пациента положении нижней челюсти, которое не всегда является физиологичным. Как показал проведённый анализ клинических наблюдений, у значительной части пациентов привычное положение нижней челюсти сопровождалось смещением суставных головок кзади, изменением размеров суставных пространств, снижением высоты нижней трети лица и выраженной мышечной адаптацией.

При изучении существующих способов лечения было установлено, что применение традиционных окклюзионных шин и капп не обеспечивает стабильного удержания нижней челюсти в терапевтическом положении на этапах активного ортодонтического лечения. Кроме того, большинство известных конструкций изготавливаются по гипсовым моделям с большим количеством ручных лабораторных этапов, что снижает точность воспроизведения окклюзионных контактов и приводит к необходимости многократной клинической коррекции.

Отдельной проблемой являлось отсутствие технологии последовательного цифрового воспроизведения окклюзионных накладок в процессе ортодонтического лечения по мере изменения положения зубов. В результате после очередного этапа перемещения зубов конструкции часто теряли стабильность фиксации, а терапевтическое положение нижней челюсти изменялось.

В связи с этим была поставлена задача разработки способа лечения, позволяющего проводить ортодонтическое перемещение зубов в заранее определённом физиологическом положении нижней челюсти с возможностью цифрового моделирования и повторного воспроизведения позиционирующих окклюзионных накладок на различных этапах лечения.

Разработка способа проводилась последовательно и включала диагностический, виртуально-моделировочный, клинический и лабораторный этапы.

На первом этапе выполнялось комплексное обследование пациентов с дистальной окклюзией. Помимо стандартного ортодонтического обследования проводили фотометрический анализ лица, биометрическое исследование зубных рядов, цифровую цефалометрию и анализ данных конусно-лучевой компьютерной томографии. Особое внимание уделялось положению головок нижней челюсти в суставных ямках, размерам суставных пространств, положению подбородка, выраженности сагиттальной щели и состоянию жевательных мышц. Полученные данные использовались для определения нового терапевтического положения нижней челюсти.

После завершения диагностического этапа проводили внутриротовое сканирование верхнего и нижнего зубных рядов, а также регистрацию межчелюстных взаимоотношений в терапевтическом положении нижней челюсти. Полученные цифровые модели фиксировали в виртуальном артикуляторе до контакта резцов, что позволяло воспроизвести новое пространственное положение челюстей и выполнить моделирование лечения не в привычной патологической окклюзии пациента, а в физиологически обоснованном положении нижней челюсти.

Следующим этапом являлось виртуальное моделирование позиционирующих окклюзионных накладок. Конструкции проектировали индивидуально для каждого пациента на жевательной поверхности первых и вторых моляров верхней и нижней челюстей. При моделировании создавали множественные фиссурно-бугорковые контакты, обеспечивающие стабильное удержание нижней челюсти и компенсацию возникающей дизокклюзии зубных рядов. Особое внимание уделяли равномерному распределению окклюзионной нагрузки, предупреждению преждевременных суперконтактов

и сохранению терапевтического положения нижней челюсти на всех этапах лечения (рисунок 17).

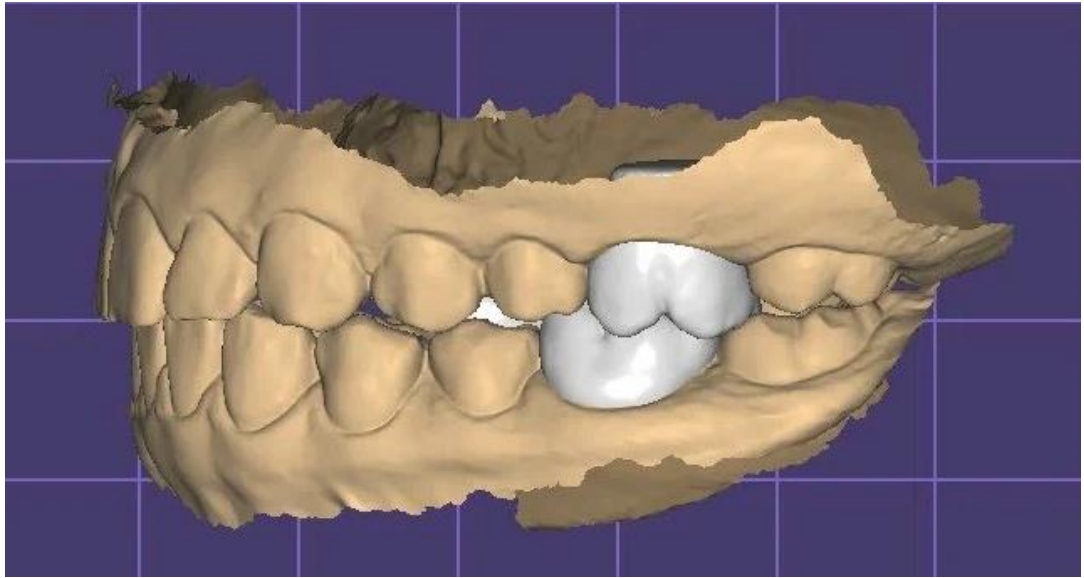


Рисунок 17 – Моделирование позиционирующих ортодонтических накладок в программа Exocad

После завершения виртуального моделирования цифровые модели накладок переводили в физические конструкции с использованием CAD/CAM- и аддитивных технологий. Изготовленные накладки фиксировали в полости рта пациента, после чего проводили установку несъёмной брекет-системы или проводили планирование и лечение на элайнерах. Ортодонтическое лечение выполняли в условиях стабилизированного положения нижней челюсти, а перемещение зубов осуществляли по горизонтали и вертикали до достижения полного смыкания зубных рядов в новом положении. Принципиальным отличием разработанного способа являлось то, что перемещение зубов проводилось не в привычной патологической окклюзии пациента, а в заранее определённом физиологическом положении нижней челюсти.

Одной из ключевых особенностей разработанного способа являлась возможность повторного цифрового воспроизведения позиционирующих окклюзионных накладок по мере изменения положения зубов. Для этого на этапах лечения выполняли повторное внутриротовое сканирование зубных

рядов как с установленными накладками, так и после их снятия. Далее цифровые модели совмещали между собой, а методом объёмного вычитания определяли виртуальное изображение ранее изготовленной конструкции. Такой подход позволял создавать новые позиционирующие накладки, полностью соответствующие изменившемуся положению зубов и сохраняющие достигнутое терапевтическое положение нижней челюсти.

Разработанный способ позволял не только стабилизировать положение нижней челюсти, но и восстанавливать высоту нижней трети лица, формировать множественные стабильные окклюзионные контакты, уменьшать мышечно-суставное напряжение и создавать более благоприятные условия для последующего ортодонтического лечения.

Результатом проведённой работы стала разработка оригинального способа устранения дистальной окклюзии зубных рядов с применением позиционирующих окклюзионных накладок, изготовленных с использованием цифровых технологий. На разработанный способ был получен патент Российской Федерации №2825047 «Способ устранения дистальной окклюзии зубных рядов».

2.6.2. Материал и метод разработки конструкционного материала для аддитивного производства позиционирующих окклюзионных накладок

В процессе выполнения исследования было установлено, что существующие стоматологические фотополимерные материалы не в полной мере соответствуют требованиям, предъявляемым к позиционирующим окклюзионным накладкам, изготавливаемым методом 3D-печати. Большинство известных материалов либо не предназначались для аддитивного производства, либо обладали недостаточной прочностью, нестабильностью геометрии после полимеризации, выраженным запахом и недостаточной устойчивостью к длительной функциональной нагрузке.

Кроме того, при использовании ряда существующих стоматологических фотополимеров отмечались высокая токсичность, раздражающее действие на слизистую оболочку полости рта, повышенная зольность и недостаточная степень детализации изделий после печати. Анализ известных композиций показал, что большинство материалов разрабатывались либо для реставрационной стоматологии, либо для общих задач фотополимерной печати и не учитывали особенностей длительной эксплуатации позиционирующих окклюзионных конструкций в условиях постоянной жевательной нагрузки.

В связи с этим была поставлена задача разработки специального светоотверждаемого конструкционного материала для 3D-печати позиционирующих окклюзионных накладок, обладающего высокой прочностью, стабильностью геометрии, низкой токсичностью, отсутствием раздражающего действия и возможностью получения прозрачных изделий с высокой точностью воспроизведения цифровой модели.

Разработка материала проводилась путём подбора компонентов фотополимерной композиции и оценки их влияния на механические свойства, реактивность, вязкость смеси, качество печати и степень детализации готовых изделий.

В качестве основы материала были выбраны олигоуретанметакрилат и олигоуретандиакрилат. Данные компоненты использовали как высокомолекулярные олигомеры, определяющие физико-механические свойства будущего изделия. Олигоуретанметакрилат обеспечивал прочность и устойчивость конструкции к изгибающим нагрузкам, а олигоуретандиакрилат повышал реактивность системы и обеспечивал высокую степень детализации при 3D-печати.

Для регулирования вязкости композиции и повышения её реактивности в состав был введён 2-гидроксиэтилметакрилат, выполняющий функцию активного разбавителя. Подбор его концентрации имел принципиальное

значение, поскольку при недостаточном содержании ухудшалась текучесть материала, а при избыточном снижались механические свойства готового изделия.

В качестве фотоинициирующей системы использовали бисацилофосфиноксид и дифенил(2,4,6-триметилбензоил)фосфиноксид. Данная комбинация обеспечивала эффективную полимеризацию композиции при воздействии света в диапазоне от 350 до 405 нм и позволяла получать стабильные результаты печати с высокой точностью формирования изделий. Было установлено, что при концентрации фотоинициаторов менее 1% ухудшались скорость и качество полимеризации, а при превышении 3% снижалась стабильность печати.

Для повышения степени детализации и сохранения прозрачности готовых изделий в состав композиции вводили тиофендибензоксазол, выполняющий функцию светостабилизатора. Установлено, что при увеличении концентрации компонента свыше 0,1% происходило торможение полимеризации, что приводило к ухудшению качества отверждения материала.

Материал получали путем интенсивного смешивания компонентов на диссольвере с нагреванием смеси до температуры не ниже 60°C до получения однородной композиции. В ходе работы были подобраны соотношения компонентов, обеспечивающие стабильный процесс печати и хорошие механические свойства готовых изделий.

Для изготовления позиционирующих окклюзионных накладок использовали композицию следующего состава:

- олигоуретанметакрилат — 65%;
- олигоуретандиакрилат — 30%;
- 2-гидроксиэтилметакрилат — 5%;
- бисацилофосфиноксид — 1–3%;
- дифенил(2,4,6-триметилбензоил)фосфиноксид — 1–3%;

– тиюфендибензоксазол — 0,02%.

Проведенные испытания показали, что изделия из разработанного материала выдерживают функциональную нагрузку и сохраняют стабильность формы даже при длительном использовании.

Прочность на изгиб составила 130 МПа, модуль упругости при изгибе — 2,95 ГПа, деформация разрушения при изгибе — 6%, а твёрдость материала — 99 Н/мм². Полученные характеристики свидетельствовали о возможности клинического применения материала для изготовления позиционирующих окклюзионных накладок длительного ношения.

Таким образом, в результате проведённого исследования был разработан оригинальный светоотверждаемый конструкционный материал для аддитивного производства позиционирующих окклюзионных накладок, обладающий необходимыми физико-механическими, технологическими и клиническими характеристиками. На разработанный материал был получен патент Российской Федерации №2853878 «Светоотверждаемая композиция для 3D-печати разобщающих прикусных накладок».

2.7. Материал и методы оценки клинической эффективности предложенного способа лечения дистальной окклюзии

После разработки способа ортодонтического лечения дистальной окклюзии с применением позиционирующих окклюзионных накладок и создания конструкционного материала для их аддитивного производства была проведена клиническая апробация предложенного лечебного алгоритма. Основной задачей данного этапа являлась оценка клинической эффективности разработанного способа лечения на основании морфологических и функциональных показателей, а также анализ стабильности достигнутого положения нижней челюсти в процессе ортодонтического лечения на элайнерах.

Методологической основой исследования послужили современные представления о биомеханике зубочелюстной системы, функциональном состоянии височно-нижнечелюстного сустава и принципах цифрового ортодонтического планирования. При формировании диагностического протокола использовали комплексный междисциплинарный подход, включающий клинические, функциональные и лучевые методы исследования, позволяющие объективно оценивать положение нижней челюсти, состояние ВНЧС и функциональную активность жевательной мускулатуры.

Исследование проводилось в формате проспективной клинической апробации по схеме «до–после лечения» без формирования отдельной контрольной группы. Такой дизайн был выбран в связи с тем, что задачей исследования являлась клиническая оценка эффективности впервые разработанного способа лечения и анализ его практической реализации в условиях комплексного цифрового ортодонтического протокола.

В исследование были включены 30 пациентов в возрасте от 21 до 43 лет. Средний возраст обследованных составил $29,4 \pm 5,9$ года. У всех пациентов диагностировалась дистальная окклюзия зубных рядов различной степени выраженности, сопровождавшаяся нарушением сагиттальных взаимоотношений зубных рядов, смещением нижней челюсти кзади и признаками функциональной перегрузки элементов височно-нижнечелюстного сустава.

У большинства пациентов дополнительно выявлялись жалобы на дискомфорт в области ВНЧС, утомляемость жевательных мышц, суставные шумы, напряжение жевательной мускулатуры, периодическую болезненность при жевании и ограничение функциональной подвижности нижней челюсти.

Критериями включения являлись возраст 21 год и старше, наличие постоянного прикуса, дистальная окклюзия зубных рядов, необходимость ортодонтического лечения с применением элайнеров, наличие клинических или инструментальных признаков дистального положения нижней челюсти,

возможность проведения КЛКТ-исследования, внутриротового сканирования и электромиографии, а также информированное согласие пациента на участие в исследовании.

Критериями не включения являлись острые воспалительные заболевания височно-нижнечелюстного сустава, выраженные дегенеративные изменения суставных поверхностей, системные заболевания соединительной ткани, ранее проведённые хирургические вмешательства на ВНЧС, выраженные посттравматические деформации челюстно-лицевой области, тяжёлые формы пародонтита, отсутствие достаточного количества опорных зубов для фиксации накладок, неудовлетворительная гигиена полости рта, невозможность выполнения КЛКТ или ЭМГ, а также низкая мотивация пациента к длительному ортодонтическому лечению.

2.7.1. Общий алгоритм лечения

На первом этапе всем пациентам проводили комплексную диагностику. Она включала клинический осмотр, фотометрический анализ лица, внутриротовое сканирование зубных рядов, цифровую биометрию, цефалометрический анализ, КЛКТ челюстей и ВНЧС, а также электромиографическое исследование жевательных мышц (рисунок 18,19).

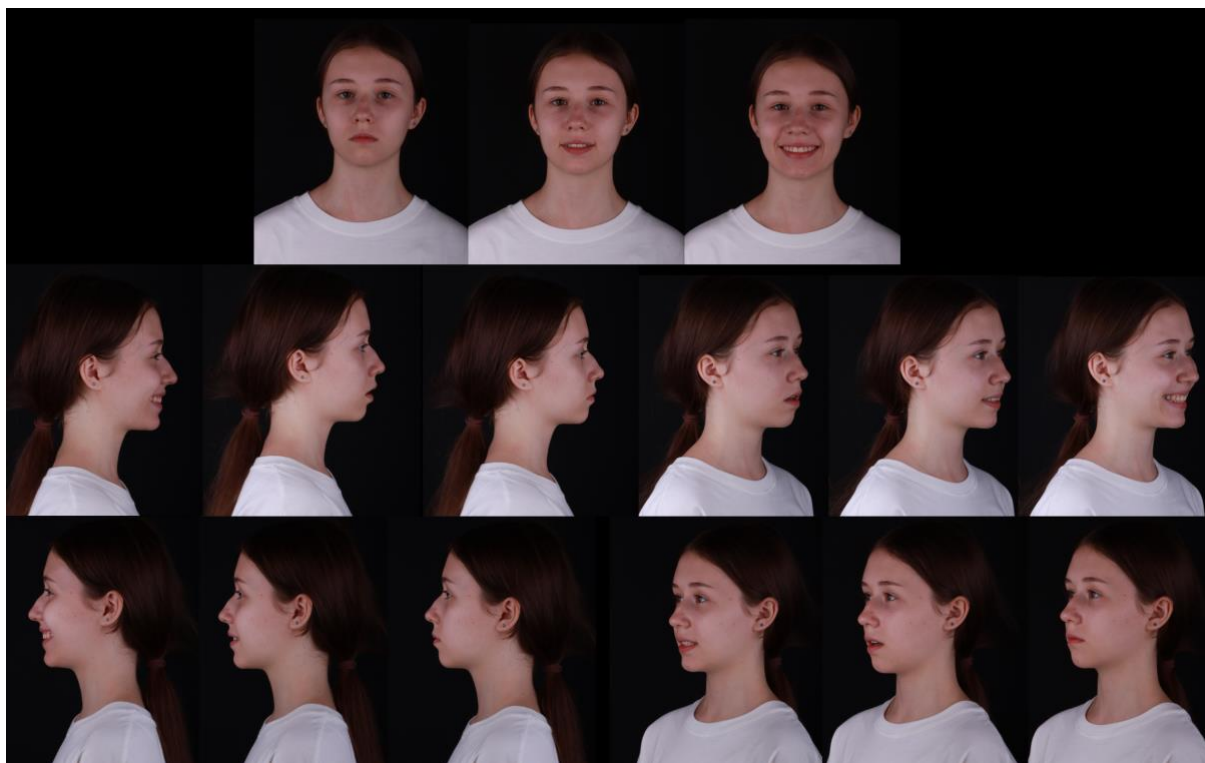


Рисунок 18 – Портретные фотографии пациента до лечения



Рисунок 19 – Внутриротовые фотографии пациента до лечения

После диагностического этапа определяли терапевтическую позицию нижней челюсти. Это положение рассматривали как функционально более благоприятное по сравнению с привычной окклюзией пациента. Оно должно

было обеспечивать уменьшение дистального смещения нижней челюсти, улучшение профиля лица, восстановление высоты нижней трети лица, снижение мышечного напряжения и более равномерное положение суставных головок в суставных ямках.

После нахождения терапевтической позиции проводили её цифровую регистрацию. Для этого выполняли внутриротовое сканирование зубных рядов и регистрацию межчелюстных взаимоотношений в найденном положении. Далее цифровые модели использовали для моделирования позиционирующих окклюзионных накладок (рисунок 20).

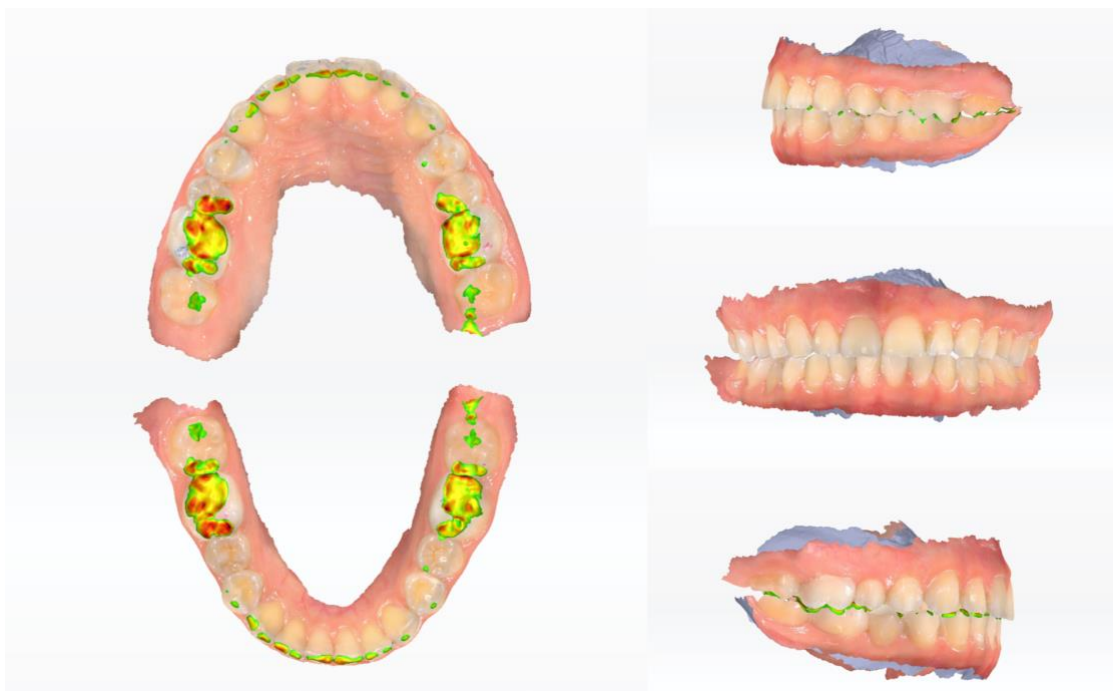


Рисунок 20 – Оптические слепки челюстей пациента с фиксированными окклюзионными позиционирующими накладками.

После изготовления и фиксации накладок проводили повторное сканирование зубных рядов уже с установленными конструкциями. Эти данные использовали для ортодонтического планирования лечения на элайнерах.

Лечение на элайнерах выполняли с учётом зафиксированной терапевтической позиции нижней челюсти. На этапах лечения контролировали посадку элайнеров, сохранность накладок, состояние

окклюзионных контактов, отсутствие переломов и дебондинга, а также динамику функциональных симптомов ВНЧС.

2.7.2. Методика КЛКТ ВНЧС

Конусно-лучевую компьютерную томографию ВНЧС выполняли всем пациентам до начала лечения, после фиксации позиционирующих окклюзионных накладок, после завершения активного ортодонтического лечения и через 6 месяцев ретенционного периода.

Исследование проводили в положении привычной окклюзии и в терапевтическом положении нижней челюсти на аппарате Vatech Green X (Корея) (рисунок 21). Анализ данных КЛКТ осуществляли в сагиттальной, коронарной и аксиальной проекциях.



Рисунок 21 – Конусно-лучевой компьютерный томограф Vatech Green X (Vatech, Корея)

КЛКТ ВНЧС использовали для оценки пространственного положения суставных головок, размеров суставных пространств, симметрии суставов и состояния костных структур височно-нижнечелюстного сустава.

На сагиттальных срезах определяли переднее, верхнее и заднее суставные пространства. На коронарных срезах оценивали медиолатеральное положение суставной головки, симметрию суставов и признаки перегрузки отдельных участков суставной поверхности. На аксиальных срезах анализировали пространственную ориентацию головки нижней челюсти и соотношение правого и левого суставов.

Основными оцениваемыми параметрами являлись положение суставной головки, ширина переднего, верхнего и заднего суставных пространств, разница между правым и левым суставом, наличие заднего смещения головки, признаки суставной компрессии, состояние кортикального контура суставной головки и суставной ямки.

Для количественной оценки симметрии рассчитывали разницу между одноимёнными суставными пространствами справа и слева. Уменьшение этой разницы после фиксации терапевтической позиции расценивали как показатель стабилизации положения нижней челюсти.

При дальнейшем наблюдении особое внимание уделяли сохранению достигнутого положения после установки накладок и в ходе лечения элайнерами.

2.7.3. Методика КЛКТ-анализа челюстей

КЛКТ челюстно-лицевой области применяли для оценки анатомических условий ортодонтического лечения и определения допустимого объема перемещения зубов.

На начальном этапе исследования КЛКТ использовали для оценки положения зубов в пределах альвеолярной кости, степени зубоальвеолярной компенсации, а также толщины вестибулярной и оральной кортикальной пластинки во фронтальных и боковых отделах.

Наибольшее внимание уделяли нижним резцам и верхним фронтальным зубам, так как при лечении дистальной окклюзии именно в этих участках чаще всего происходят наиболее выраженные перемещения зубов.

Во время ортодонтического планирования данные КЛКТ сопоставляли с виртуальными моделями зубных рядов. Такой подход позволял учитывать не только положение коронок, видимых при внутриротовом сканировании, но и реальное расположение корней зубов в костной ткани.

Перемещение зубов на элайнерах планировали таким образом, чтобы не допустить выхода корней за пределы альвеолярной кости и не создавать условий для формирования дегисценций, фенестраций и рецессий десны.

В процессе анализа оценивали толщину кортикальной кости альвеолярного отростка верхней челюсти и альвеолярной части нижней челюсти, расстояние от корней зубов до наружной и внутренней кортикальной пластинки, ширину альвеолярной кости в зоне планируемого перемещения, а также наличие костных ограничений.

Если толщина кортикальной кости была недостаточной, объём перемещения зубов ограничивали или изменяли направление ортодонтической коррекции.

2.7.4. Методика определения терапевтической позиции нижней челюсти с применением Авантис 3D

Определение терапевтической позиции нижней челюсти являлось ключевым этапом исследования, поскольку именно в этом положении затем проводилось моделирование накладок и ортодонтическое планирование.

Первично оценивали привычное положение нижней челюсти. Для этого анализировали профиль лица, выраженность дистального положения подбородка, величину сагиттальной щели, высоту нижней трети лица, наличие мышечного напряжения и характер открывания рта. Далее проводили КЛКТ ВНЧС и оценивали положение суставных головок в суставных ямках.

Для цифрового определения терапевтической позиции использовали программный комплекс Авантис 3D. В программу загружали данные КЛКТ головы и цифровые модели зубных рядов, полученные методом внутриротового сканирования. Затем эти данные объединяли в единую

трёхмерную сцену, что позволяло одновременно анализировать зубные ряды, челюсти, суставные головки и межсуставные пространства.

После совмещения данных выполняли анализ истинного положения суставных головок и моделировали предполагаемое терапевтическое положение нижней челюсти. При этом ориентировались на равномерность суставной щели, симметрию правого и левого ВНЧС и размеры переднего, верхнего и заднего суставных пространств (рисунок 22).

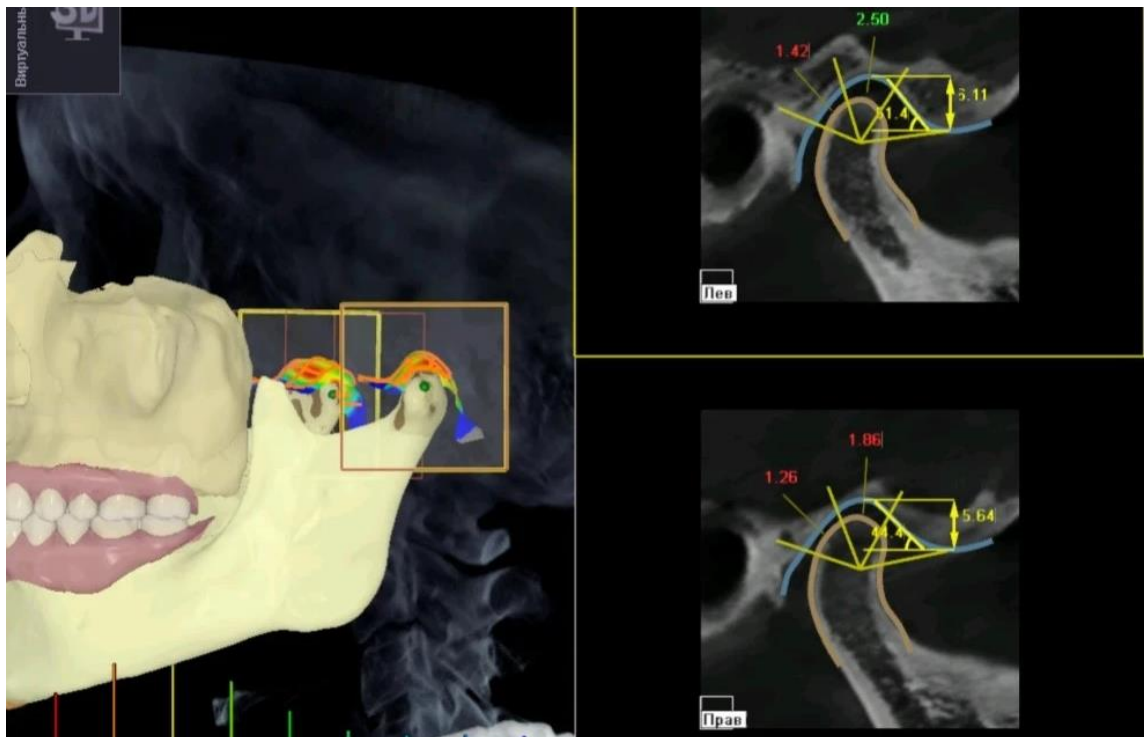


Рисунок 22 – Анализ привычного положения нижней челюсти в программе
Авантис 3Д

После совмещения данных выполняли сравнение привычного положения нижней челюсти с предполагаемой терапевтической позицией. Оценивали положение суставных головок, размеры суставных пространств и степень симметрии правого и левого ВНЧС. Полученные цифровые параметры фиксировали в регистрационной карте пациента и использовали для последующего моделирования позиционирующих окклюзионных накладок (рисунок 23).

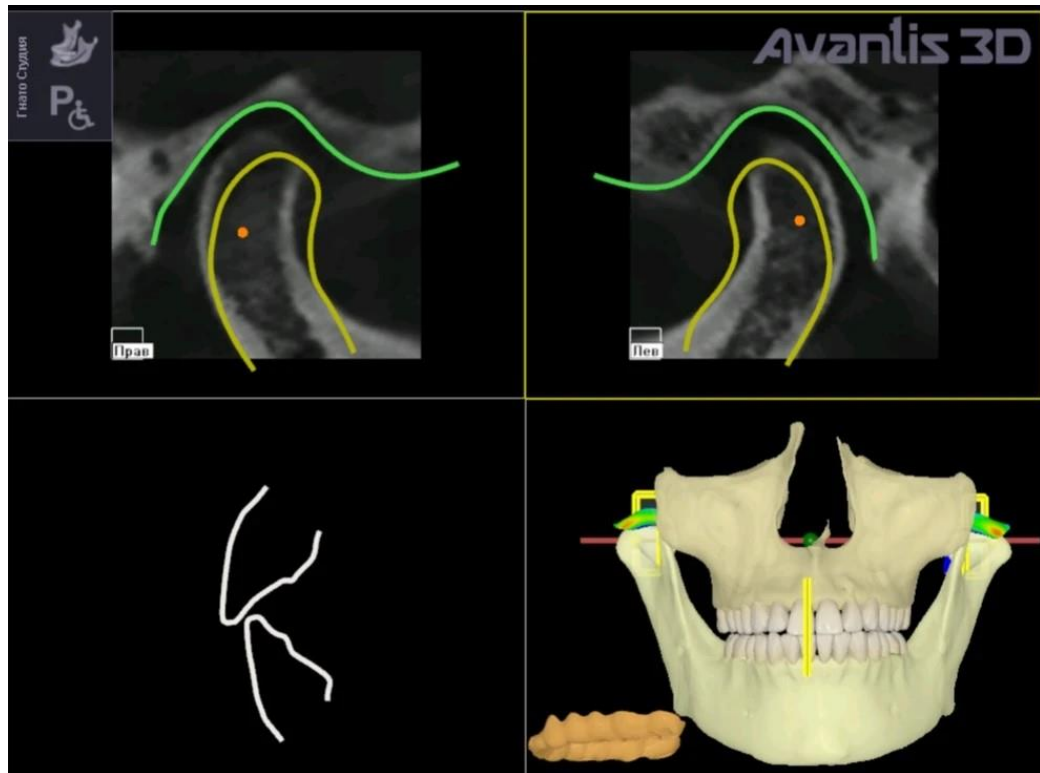


Рисунок 23 – Совмещения данных привычного положения нижней челюсти с предполагаемой терапевтической позицией в программе Авантис 3Д

Для уточнения положения нижней челюсти дополнительно применяли функциональную депрограммацию жевательной мускулатуры. В качестве вспомогательных средств использовали листовой калибратор Коиса и депрограмматор U-Dent Callibri («Нейротех», Россия). После 10-минутного расслабления собственно жевательных и височных мышц с использованием датчика функциональной активности и листового калибратора калибратор удаляли, не позволяя пациенту сомкнуть зубные ряды в привычной окклюзии. Затем между центральными резцами верхней челюсти фиксировали джиг Люсиа, на котором с помощью артикуляционной бумаги определяли новое положение нижней челюсти и фиксировали его силиконовым регистрационным материалом.

Использование функциональной депрограммации позволяло уменьшить влияние привычного мышечного паттерна и получить более стабильное

положение нижней челюсти перед регистрацией межчелюстных взаимоотношений.

После клинической регистрации положения выполняли повторное внутриротовое сканирование зубных рядов в терапевтической позиции. Далее проводили контрольное сопоставление полученного положения с данными КЛКТ ВНЧС. Терапевтическая позиция считалась приемлемой при уменьшении дистального положения суставных головок, снижении асимметрии суставных пространств, улучшении профиля лица, восстановлении высоты нижней трети лица и субъективном комфорте пациента.

2.7.5. Методика электромиографического исследования на аппарате «Нейротех»

Электромиографическое исследование проводили для объективной оценки функционального состояния жевательной мускулатуры и контроля изменения мышечной активности после фиксации терапевтической позиции нижней челюсти.

Регистрацию биоэлектрической активности проводили с использованием электромиографического комплекса «Колибри» («Нейротех», Россия), предназначенного для функциональной диагностики жевательной мускулатур.

Исследование проводили в помещении с минимальными электромагнитными помехами при комнатной температуре. Перед началом регистрации пациент находился в положении сидя в течение 5 минут для функциональной адаптации.

Перед фиксацией электродов кожу очищали и обезжиривали 70% этиловым спиртом. Электроды размещали симметрично справа и слева параллельно ходу мышечных волокон.

В области собственно жевательных мышц электроды фиксировали в зоне наибольшего выбухания мышцы при сжатии зубных рядов. В области

передних пучков височных мышц электроды устанавливали над скуловой дугой в проекции передних отделов мышцы. Референсный электрод размещали в нейтральной зоне, чаще всего в области лба.

Такое расположение электродов обеспечивало стабильную регистрацию биоэлектрической активности мышц и позволяло корректно сравнивать показатели правой и левой стороны (рисунок 24).



Рисунок 24 – Методика проведения ЭМГ с помощью комплекса «Колибри» («Нейротех», Россия).

Регистрацию проводили в трёх функциональных режимах. На первом этапе в течение 30 секунд записывали биоэлектрическую активность мышц в состоянии физиологического покоя. Далее пациент выполнял максимальное произвольное смыкание зубных рядов. Проводили три пробы продолжительностью по 5 секунд с интервалом 10 секунд между ними. Затем выполняли регистрацию максимального волевого сжатия ватных валиков в течение 20 секунд. Такой тест позволял уменьшить влияние окклюзионных контактов и отдельно оценить активность жевательной мускулатуры. Используемый протокол исследования позволял объективно оценивать функциональное состояние жевательной мускулатуры как в покое, так и при функциональной нагрузке.

При анализе ЭМГ оценивали среднюю амплитуду биоэлектрической активности, RMS-показатель, интегральную активность мышц, симметрию работы правой и левой стороны, а также соотношение активности собственно жевательных и височных мышц.

Повышенная активность в покое рассматривалась как признак мышечного гипертонуса, а выраженная асимметрия — как признак функционального дисбаланса жевательной мускулатуры.

Для количественной оценки симметрии использовали коэффициент асимметрии:

$$KA = \frac{|R - L|}{R + L} \times 100\%$$

где R — значение показателя справа, L — значение показателя слева.

Снижение коэффициента асимметрии после фиксации накладок и в процессе лечения расценивали как признак нормализации функции жевательной мускулатуры.

2.7.6. Ортодонтическое планирование и лечение на элайнерах

После определения терапевтической позиции нижней челюсти и её подтверждения по данным КЛКТ и ЭМГ выполняли цифровое моделирование позиционирующих окклюзионных накладок.

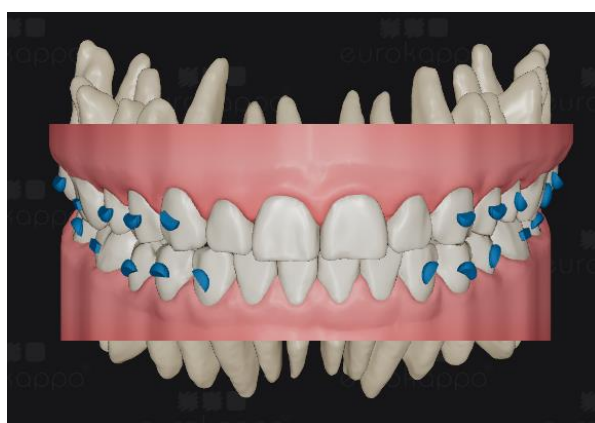
Накладки проектировали с учётом нового межчелюстного соотношения и необходимости сохранения стабильных фиссурно-бугорковых контактов в боковых отделах и фиксировали в полости рта на жидкотекучий композит (рисунок 25).



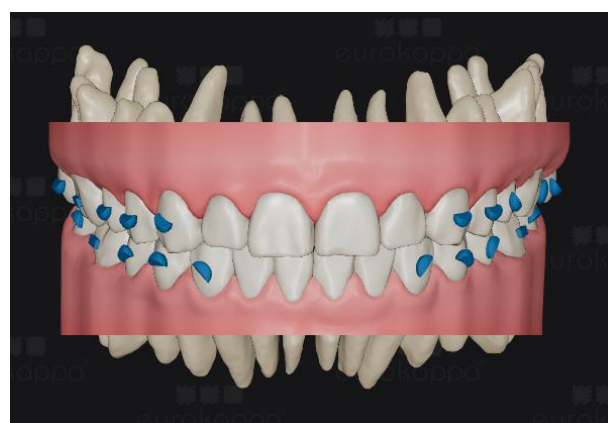
Рисунок 25 – Позиционирующие окклюзионные накладки фиксированы в полости рта пациента.

После фиксации накладок проводили повторное внутриротовое сканирование зубных рядов. Полученные цифровые модели использовали для ортодонтического планирования лечения на элайнерах.

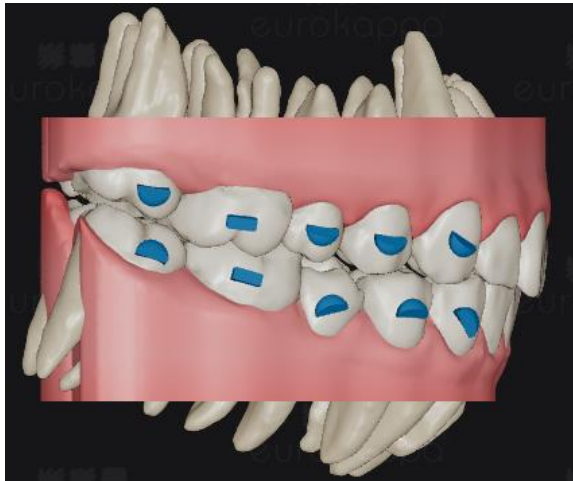
Перемещение зубов рассчитывали с учётом положения накладок, терапевтической позиции нижней челюсти, данных КЛКТ челюстей и ограничений со стороны альвеолярной кости (рисунок 26).



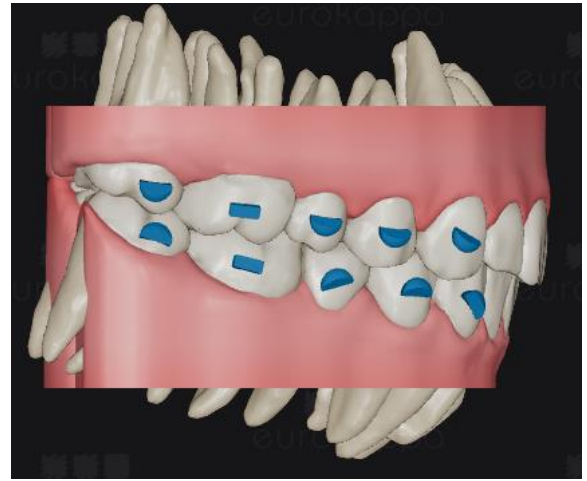
А



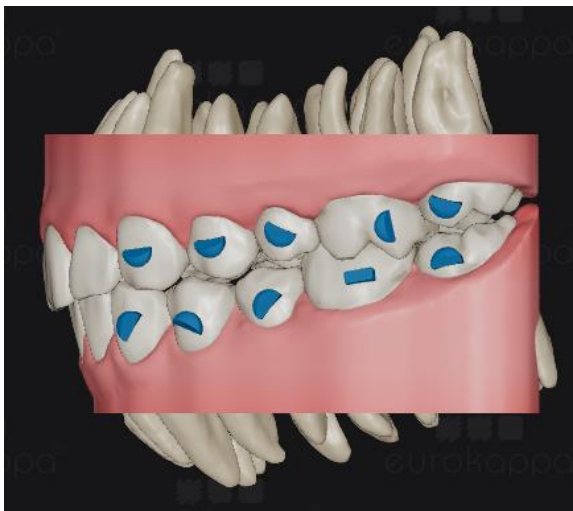
Б



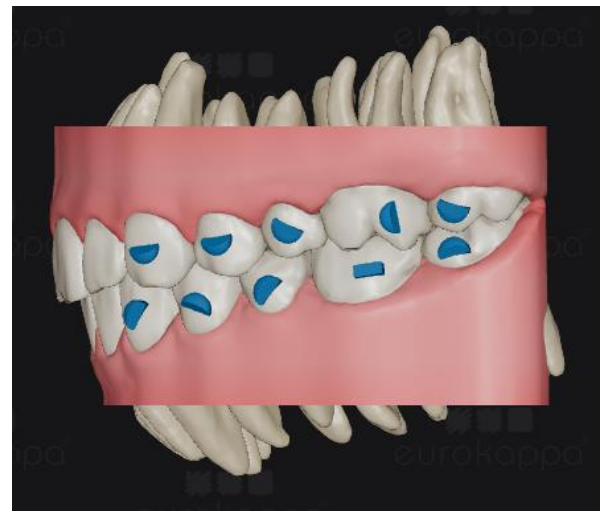
В



Г



Д



Е

Рисунок 26 – Виртуальное планирование ортодонтического лечения пациента с позиционирующими окклюзионными накладками: А – фронтальная проекция до лечения; Б – фронтальная проекция после лечения; В – боковая проекция справа до лечения; Г – боковая проекция справа после лечения; Д - боковая проекция слева до лечения; Е – боковая проекция слева после лечения

Лечение проводили с последовательной сменой элайнеров. На контрольных визитах оценивали посадку элайнеров, состояние накладок, стабильность окклюзионных контактов, наличие или отсутствие дебондинга, трещин, переломов и необходимости внеплановой замены конструкций.

После смыкания зубов до окклюзионных контактов, окклюзионные накладки удалялись и выполняли повторное сканирование, и корректировку цифрового плана (рисунок 27).



А



Б



В



Г



Д



Е

Рисунок 27 – Виртуальное планирование ортодонтического лечения пациента после удаления позиционирующих окклюзионных накладок: А – фронтальная проекция до лечения; Б – фронтальная проекция после лечения; В – боковая проекция справа до лечения; Г – боковая проекция справа после лечения; Д - боковая проекция слева до лечения; Е – боковая проекция слева после лечения

После завершения активного лечения переходили к ретенционному этапу. Ретенционные аппараты изготавливали с учётом достигнутого положения зубов и стабилизированного положения нижней челюсти.

2.7.7. Сроки наблюдения и критерии оценки эффективности

Оценку результатов проводили в пять контрольных этапов:

T0 — до начала лечения;

T1 — после фиксации позиционирующих окклюзионных накладок;

T2 — через 6 месяцев лечения на элайнерах;

T3 — после завершения активного ортодонтического лечения;

T4 — через 6 месяцев ретенции.

Клиническую эффективность оценивали по снижению боли и дискомфорта в области ВНЧС, уменьшению щелчков и суставных шумов, увеличению амплитуды открывания рта, уменьшению девиации нижней челюсти, снижению мышечного напряжения, нормализации ЭМГ-показателей, улучшению положения суставных головок по данным КЛКТ, уменьшению асимметрии суставных пространств, улучшению сагитальной щели и глубины резцового перекрытия, а также достижению стабильных окклюзионных контактов.

Отдельно оценивали надёжность позиционирующих накладок. Учитывали наличие переломов, трещин, сколов, дебондинга, необходимость внеплановой замены и сохранение стабильной фиксации в течение лечения.

2.7.8. Методы статистической обработки данных

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программ Microsoft Excel и Statistica.

Для количественных показателей рассчитывали среднее арифметическое значение, стандартное отклонение, медиану, минимальные и максимальные значения.

Проверку распределения данных выполняли с использованием критерия Шапиро–Уилка. При нормальном распределении применяли t-критерий Стьюдента для связанных выборок. При распределении, отличном от нормального, использовали критерий Уилкоксона.

Различия считали статистически значимыми при уровне вероятности ошибки первого рода $p < 0,05$.

Дополнительно рассчитывали размер клинического эффекта, позволяющий оценить не только статистическую достоверность изменений, но и их практическую значимость для клинической ортодонтии.

2.8. Материал и метод разработки цифрового модуля моделирования позиционирующих окклюзионных накладок

Следующим этапом исследования стала разработка цифрового модуля моделирования позиционирующих окклюзионных накладок в терапевтическом положении нижней челюсти и оценка его точности и воспроизводимости. Данный этап являлся продолжением ранее разработанного способа лечения дистальной окклюзии, поскольку после определения терапевтической позиции нижней челюсти возникала необходимость в точном, воспроизводимом и клинически удобном инструменте для проектирования накладок, фиксирующих это положение в процессе ортодонтического лечения на элайнерах.

Разработка модуля проводилась в два последовательных этапа. На первом этапе создавался сам цифровой инструмент: определялись форматы

загружаемых моделей, логика сопоставления челюстей, алгоритм построения накладки, инструменты коррекции и порядок экспорта готовой конструкции. На втором этапе выполнялась оценка точности и воспроизводимости разработанного метода в сравнении с традиционным способом ручного моделирования подобных конструкций в универсальных CAD-системах. Такой подход соответствует общей структуре главы 2, где каждый цифровой метод сначала описывается как разработка, а затем проходит отдельную проверку эффективности.

2.8.1. Материал для разработки цифрового модуля моделирования позиционирующих окклюзионных накладок

Материалом для разработки модуля служили цифровые модели верхней и нижней челюстей пациентов с дистальной окклюзией, полученные методом внутриротового оптического сканирования. Дополнительно использовались цифровые регистры прикуса, фиксирующие терапевтическое положение нижней челюсти, ранее определённое по данным комплексной диагностики, включавшей клиническую оценку, КЛКТ ВНЧС, анализ положения суставных головок и функциональную оценку жевательной мускулатуры.

В качестве исходных данных применялись трёхмерные модели в форматах STL и OBJ. Эти форматы были выбраны как наиболее распространённые в цифровой стоматологии и пригодные для последующего проектирования, обработки и передачи конструкции на 3D-печать. В модуле была предусмотрена загрузка верхней челюсти, нижней челюсти и одного или нескольких цифровых регистров прикуса, что позволяло правильно собрать модели в терапевтическом положении нижней челюсти.

Основной задачей при разработке модуля было создание инструмента, который позволял бы врачу или оператору не просто вручную «нарисовать» накладку на поверхности зубов, а построить её с учётом реального положения челюстей, окклюзионного контакта, пути введения, цементного зазора и необходимости последующего аддитивного производства.

Цифровой модуль разрабатывался на базе Unreal Engine 5 с применением C++ и/или Blueprints. Для загрузки и обработки трёхмерных моделей использовалась библиотека Assimp, позволяющая импортировать модели в форматах STL и OBJ с сохранением геометрии поверхности. Такой выбор был обусловлен тем, что модуль должен был работать с моделями высокой детализации, характерными для внутриротового сканирования, и при этом обеспечивать достаточную скорость визуализации и редактирования.

В структуру разрабатываемого модуля были заложены следующие рабочие блоки: загрузка цифровых моделей, автоматическая сборка верхней и нижней челюсти по регистрату прикуса, подгонка масштаба и пространственной ориентации, формирование границ накладки, определение пути введения, задание цементного зазора, построение тела накладки, анализ окклюзионных пересечений, ручная коррекция поверхности и экспорт готовой модели для производства.

2.8.2. Методика разработки цифрового модуля моделирования позиционирующих окклюзионных накладок

Разработка цифрового модуля выполнялась последовательно, в несколько этапов.

Сначала был создан интерфейс для загрузки трехмерных моделей. Пользователь мог импортировать модель верхней челюсти, модель нижней челюсти и цифровой регистрат прикуса. После загрузки объекты отображались в рабочем пространстве программы в формате 3D. Для корректной работы системе автоматически задавался тип каждой модели: верхняя челюсть, нижняя челюсть, основной регистрат прикуса или дополнительный регистрат. Благодаря этому программа правильно распознавала объекты и использовала их при последующей сборке.

Следующим этапом стала реализация автоматической сборки моделей. После загрузки программа сопоставляла верхнюю и нижнюю челюсти по цифровому регистрату прикуса, выравнивала модели по масштабу и

корректировала их положение в пространстве. При необходимости врач мог вручную уточнить положение моделей, однако основная часть процесса выполнялась автоматически. Это было особенно важно, поскольку даже незначительное смещение могло привести к неправильному положению будущей накладки и нарушению фиксации терапевтического положения нижней челюсти.

На третьем этапе разрабатывался алгоритм построения позиционирующей окклюзионной накладки. После сборки моделей оператор определял участок зубного ряда, на котором должна располагаться конструкция. Как правило, накладка моделировалась в боковых отделах зубных рядов, в зоне премоляров и моляров, где можно было обеспечить стабильную опору и равномерное распределение нагрузки. Затем задавались границы конструкции, путь введения и величина цементного зазора (рисунок 28).

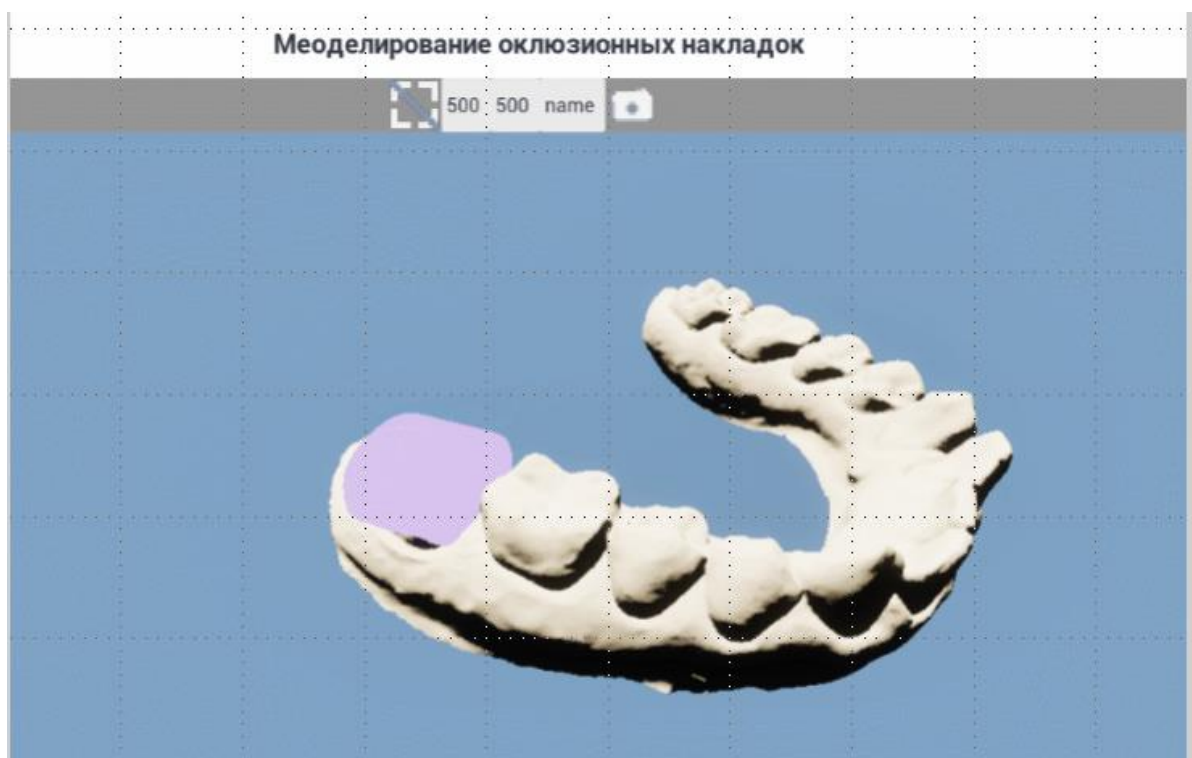


Рисунок 28 – Этап моделирования окклюзионных накладок в интерфейсе модуля «Моделирование окклюзионных накладок»

Цементный зазор задавался в цифровой среде до построения окончательной формы накладки. Это позволяло заранее учитывать толщину

фиксирующего материала и предупреждать избыточное давление конструкции на зубы после фиксации. При этом внутренняя поверхность накладки формировалась по анатомии опорных зубов, а наружная окклюзионная поверхность — с учётом контактов с зубами-антагонистами в терапевтическом положении нижней челюсти.

Формирование тела накладки осуществлялось с использованием процедурного мэша и булевых операций. По сути, программа строила объём конструкции между поверхностью зубного ряда и внешней окклюзионной поверхностью, после чего выполняла вычитание лишних участков и адаптацию внутренней поверхности к анатомии зубов. Такой подход позволял получать индивидуальную конструкцию, а не стандартный блок, подогнанный вручную.

Отдельный этап разработки был связан с анализом окклюзионных пересечений. После построения накладки программа определяла участки избыточного контакта с зубами-антагонистами. Эти участки отображались в рабочем окне программы и могли корректироваться автоматически или вручную. Наличие такой функции имело большое значение, поскольку позиционирующая накладка должна не только удерживать нижнюю челюсть в заданном положении, но и исключать выраженные преждевременные контакты, способные вызывать дискомфорт или перегрузку отдельных зубов.

Следующим этапом стала реализация инструментов цифровой коррекции. После автоматического построения конструкции оператор мог использовать цифровую кисть для сглаживания поверхности, локального удаления материала, выравнивания отдельных участков и устранения мелких дефектов модели. Программа позволяла изменять силу воздействия инструмента, что давало возможность выполнять как более грубую, так и точную коррекцию. Такая доработка была необходима, поскольку автоматический алгоритм формировал основную геометрию конструкции, однако в ряде клинических

ситуаций требовалась ручная коррекция краевых участков, переходных зон и окклюзионной поверхности.

После завершения моделирования готовая накладка экспортировалась в STL- или OBJ-формате. Полученный файл мог быть использован для дальнейшего аддитивного производства из разработанного конструкционного материала. На этапе экспорта проверялась целостность модели, отсутствие открытых поверхностей, грубых пересечений и геометрических дефектов, которые могли бы нарушить процесс 3D-печати.

Таким образом, разработанный цифровой модуль обеспечивал полный цикл виртуального моделирования позиционирующих окклюзионных накладок: от загрузки моделей зубных рядов и цифрового регистрата прикуса до построения конструкции, её коррекции и экспорта производственного файла.

2.8.3. Методика оценки точности и воспроизводимости цифрового моделирования позиционирующих окклюзионных накладок

После завершения разработки модуля была проведена оценка его точности и воспроизводимости. Основной задачей данного этапа являлось определение того, насколько разработанный цифровой способ позволяет получать стабильные, геометрически точные и клинически пригодные конструкции по сравнению с традиционным ручным моделированием позиционирующих накладок в универсальных CAD-программах.

Исследование проводилось на цифровых моделях 30 пациентов с дистальной окклюзией, включённых в клинический этап оценки эффективности предложенного способа лечения. У каждого пациента были получены цифровые модели верхней и нижней челюсти, а также регистрат терапевтического положения нижней челюсти. Для оценки точности использовали 60 позиционирующих окклюзионных накладок, по две конструкции на каждого пациента — для правого и левого боковых отделов зубных рядов.

Для каждого клинического случая выполняли два варианта моделирования. Первый вариант представлял собой моделирование накладки в разработанном цифровом модуле. Второй вариант выполнялся традиционным способом в универсальной CAD-системе, где границы конструкции, внутренняя поверхность, окклюзионная поверхность и коррекция контактов формировались преимущественно вручную. Оба варианта моделирования выполнялись на одних и тех же исходных цифровых данных.

Оценка точности включала несколько параметров: соответствие внутренней поверхности накладки анатомии опорных зубов, точность воспроизведения заданного цементного зазора, совпадение окклюзионных контактов с цифровым планом, сохранение терапевтического положения нижней челюсти и необходимость дополнительной коррекции конструкции после изготовления.

Оценка геометрической точности

Геометрическую точность определяли путём сопоставления цифровой модели накладки с фактически изготовленной конструкцией. После 3D-печати накладки сканировали, после чего полученную модель совмещали с исходным проектом. Совмещение выполняли по всей поверхности конструкции, а затем отдельно анализировали внутреннюю посадочную поверхность и окклюзионную поверхность.

Основным количественным показателем являлось среднеквадратичное отклонение поверхностей — RMS:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}$$

где x_i — координаты точек исходной цифровой модели, y_i — координаты соответствующих точек отсканированной конструкции, n — количество анализируемых точек.

Чем меньше значение RMS, тем выше считалась точность цифрового моделирования и последующего изготовления. Дополнительно рассчитывали среднее абсолютное отклонение поверхности:

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n}$$

где MAD отражало среднюю величину расхождения между запланированной и фактически полученной поверхностью конструкции.

Например, если при сравнении внутренней поверхности накладки среднее отклонение составило 0,08 мм, а RMS — 0,11 мм, такая конструкция расценивалась как клинически точная и пригодная к фиксации без выраженной коррекции.

Оценка точности цементного зазора

Отдельно оценивали точность воспроизведения цементного зазора. Для этого в цифровой модели выделяли контрольные точки на внутренней поверхности накладки: в окклюзионной зоне, на скатах бугров, в проксимальных участках и в краевых зонах. В каждой точке сравнивали запланированную величину цементного зазора с фактическим расстоянием между внутренней поверхностью накладки и поверхностью зуба.

Абсолютная ошибка цементного зазора рассчитывалась по формуле:

$$\Delta C = |C_p - C_f|$$

где C_p — запланированная величина цементного зазора, C_f — фактически полученное значение.

Низкие значения ΔC свидетельствовали о высокой точности внутренней адаптации конструкции. Для клинической оценки дополнительно фиксировали наличие плотной посадки, участков чрезмерного давления и необходимость коррекции внутренней поверхности.

Оценка воспроизведения окклюзионных контактов

Поскольку позиционирующая накладка должна удерживать нижнюю челюсть в терапевтическом положении, отдельное значение имела точность

воспроизведения окклюзионных контактов. Оценивали количество и расположение запланированных контактов на цифровой модели и сопоставляли их с фактически полученными контактами после изготовления конструкции.

Процент совпадения окклюзионных контактов рассчитывали по формуле:

$$C_{occl} = \frac{N_c}{N_p} \times 100\%$$

где N_c — количество совпадающих контактов, N_p — количество контактов, запланированных в цифровой модели.

Например, если в цифровом проекте было предусмотрено 10 стабильных окклюзионных контактов, а после изготовления конструкции совпадали 9 из них, показатель совпадения рассчитывали следующим образом:

$$C_{occl} = \frac{9}{10} \times 100 = 90\%$$

Высокий процент совпадения указывал на точный перенос цифрового проекта в готовую конструкцию.

Оценка сохранения терапевтического положения нижней челюсти

Дополнительно оценивали способность изготовленной накладки сохранять заданное терапевтическое положение нижней челюсти. Для этого после установки конструкции на цифровые модели повторно анализировали межчелюстное соотношение. Оценивали величину вертикального разобщения, сагиттальное положение нижней челюсти и наличие бокового смещения.

Отклонение терапевтической позиции определяли как разницу между запланированным и фактическим положением:

$$\Delta P = | P_p - P_f |$$

где P_p — запланированное положение, P_f — фактическое положение после установки накладки.

Отдельно учитывали вертикальное отклонение в миллиметрах, сагиттальное отклонение в миллиметрах и угловое отклонение в градусах. Конструкция считалась клинически точной, если отклонение положения нижней челюсти не превышало 0,5 мм по линейным параметрам и 1,0° по угловым параметрам.

Оценка необходимости коррекции конструкции

Практическая пригодность цифрового моделирования оценивалась не только по числовым отклонениям, но и по объёму клинической коррекции. После изготовления фиксировали количество конструкций, которые требовали дополнительной обработки внутренней поверхности, коррекции краёв или окклюзионной поверхности.

Частота коррекции рассчитывалась по формуле:

$$K = \frac{N_k}{N} \times 100\%$$

где N_k — количество конструкций, потребовавших коррекции, N — общее количество изготовленных конструкций.

Чем ниже была частота коррекции, тем выше оценивалась практическая точность метода.

Оценка воспроизводимости цифрового моделирования

Воспроизводимость оценивали по двум направлениям: повторяемость результата одним оператором и совпадение результатов между разными операторами. Для этого часть клинических случаев моделировалась повторно через 14 дней без доступа к первичному результату. Кроме того, одни и те же цифровые данные обрабатывались тремя операторами, владеющими протоколом цифрового моделирования.

Для оценки воспроизводимости сопоставляли геометрию полученных накладок, величину цементного зазора, положение окклюзионных контактов и время моделирования. Основным статистическим показателем являлся коэффициент внутриклассовой корреляции — ICC. Значения ICC выше 0,90

расценивали как отличную воспроизводимость, от 0,75 до 0,90 — как хорошую, ниже 0,75 — как недостаточную.

Дополнительно рассчитывали ошибку метода по формуле Дальберга:

$$ME = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

где d — разница между повторными измерениями, n — количество повторных измерений.

Например, если при повторном моделировании отклонения RMS между двумя вариантами конструкции составляли 0,08 мм, 0,10 мм, 0,09 мм, 0,11 мм и 0,07 мм, ошибка метода рассчитывалась по указанной формуле и использовалась для оценки стабильности цифрового протокола.

Также рассчитывали коэффициент вариации:

$$CV = \frac{SD}{M} \times 100\%$$

где SD — стандартное отклонение, M — среднее значение показателя.

Низкие значения коэффициента вариации свидетельствовали о стабильности результата при повторном моделировании.

Оценка временной эффективности

Отдельно оценивали время, затрачиваемое на моделирование одной конструкции. При цифровом способе фиксировали время загрузки моделей, сборки челюстей в терапевтическом положении, построения накладки, коррекции поверхности и экспорта файла. При традиционном способе учитывали время ручной подготовки моделей, построения конструкции, коррекции окклюзионной поверхности и подготовки файла к производству.

Среднее время моделирования рассчитывали по формуле:

$$T_{avg} = \frac{\sum T}{n}$$

где T — время моделирования одной конструкции, n — количество конструкций.

Процент сокращения времени определяли следующим образом:

$$E_t = \frac{T_t - T_d}{T_t} \times 100\%$$

где T_t — время традиционного моделирования, T_d — время цифрового моделирования в разработанном модуле.

Данный показатель позволял оценить не только точность, но и практическую пригодность модуля для повседневной клинической работы.

Статистическая обработка данных

Статистическую обработку результатов проводили с использованием Microsoft Excel и Statistica. Для количественных показателей рассчитывали среднее значение, стандартное отклонение, медиану, минимальные и максимальные значения.

Нормальность распределения проверяли критерием Шапиро–Уилка. При нормальном распределении для сравнения цифрового и традиционного способов использовали t-критерий Стьюдента для связанных выборок. При распределении, отличном от нормального, применяли критерий Уилкоксона. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Согласованность и воспроизводимость результатов оценивали по коэффициенту внутриклассовой корреляции, ошибке метода по Дальбергу, коэффициенту вариации и анализу Bland–Altman.

Метод цифрового моделирования позиционирующих окклюзионных накладок считали эффективным при низких значениях RMS и среднего абсолютного отклонения, точном воспроизведении цементного зазора, высоком совпадении окклюзионных контактов, сохранении терапевтического положения нижней челюсти, высокой воспроизводимости повторного моделирования, сокращении времени проектирования и снижении потребности в ручной коррекции конструкции.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Результаты разработки цифрового способа фотометрического анализа и оценка его диагностической эффективности

3.1.1. Результаты разработки цифрового способа фотометрического анализа

В результате проведённой работы был разработан цифровой способ фотометрического анализа портретных и внутриротовых фотографий пациента, предназначенный для комплексной оценки эстетических, морфометрических и функциональных параметров зубочелюстно-лицевой области в процессе ортодонтической диагностики.

Разработанный модуль обеспечивал последовательное выполнение всех этапов фотометрического исследования: загрузку изображений, выбор типа фотографии, нанесение антропометрических ориентиров, автоматическое построение диагностических линий и плоскостей, выполнение линейных и угловых измерений, расчёт индексов, визуализацию результатов и формирование итогового отчёта.

В ходе разработки была реализована возможность работы с портретными фотографиями лица анфас, анфас с улыбкой, анфас с ретракторами, профильными фотографиями справа и слева, а также с внутриротовыми изображениями зубных рядов. Система поддерживала загрузку изображений в форматах PNG и JPG и позволяла выполнять анализ как локально, так и с использованием базы данных пациентов.

Одним из ключевых этапов разработки являлось создание интерактивной системы нанесения антропометрических ориентиров. В программе была реализована возможность ручной установки точек с их последующей коррекцией, перемещением или удалением без необходимости повторной загрузки изображения. Каждая точка сопровождалась обозначением и сохранялась в структуре проекта для дальнейших расчётов.

После нанесения ориентиров программа автоматически выполняла построение диагностических линий, осей и плоскостей, необходимых для фотометрического анализа. Были реализованы алгоритмы автоматического расчёта ширины головы, морфологической ширины лица, гониальной ширины, полной, средней и нижней морфологической высоты лица, индекса Изара, угла профиля, носогубного угла, положения губ относительно эстетической линии Риккетса, а также параметров улыбки и положения окклюзионной плоскости.

Дополнительно в программе была реализована функция визуализации результатов анализа. После выполнения расчётов на изображении отображались нанесённые антропометрические точки, соединяющие линии, углы, оси и плоскости, что позволяло врачу визуально контролировать корректность выполненных измерений. Предусматривалась возможность последовательного включения и отключения отдельных элементов визуализации для детального анализа конкретных параметров.

Существенным преимуществом разработанного цифрового способа являлась автоматизация вычислительного этапа. После завершения расстановки антропометрических точек программа автоматически выполняла все расчёты и формировала итоговое заключение менее чем за 1 минуту. Основное время работы было связано не с вычислениями, а с загрузкой изображений и нанесением ориентиров.

В ходе тестирования было установлено, что среднее время выполнения полного цифрового фотометрического анализа одного пациента составляло $15,2 \pm 2,4$ минуты. При этом непосредственно автоматический расчёт параметров и формирование отчёта занимали в среднем 52 ± 11 секунд.

Для сравнения, выполнение аналогичного объёма измерений традиционным ручным способом требовало от 60 до 70 минут в зависимости от сложности клинического случая и количества анализируемых параметров.

В разработанном модуле также была реализована функция автоматического формирования отчёта. В итоговый отчёт включались: исходные фотографии; нанесённые антропометрические ориентиры; линейные и угловые параметры; расчётные индексы; нормативные значения; интерпретация полученных результатов; итоговое диагностическое заключение.

Все данные сохранялись в базе исследования и могли быть повторно использованы для динамического наблюдения пациента на различных этапах ортодонтического лечения.

Проведённое тестирование показало стабильную работу программного модуля, отсутствие критических ошибок при обработке изображений и высокую скорость выполнения расчётов даже при большом количестве одновременно анализируемых параметров.

Таким образом, в результате исследования был разработан полноценный цифровой способ фотометрического анализа, позволяющий автоматизировать основные этапы ортодонтической фотометрической диагностики, уменьшить влияние субъективного фактора и существенно сократить время проведения анализа.

3.1.2. Результаты оценки диагностической эффективности цифрового фотометрического анализа

В исследование были включены 60 пациентов в возрасте от 21 до 43 лет. Средний возраст пациентов составил $28,6 \pm 5,4$ года. Среди обследованных было 38 женщин (63,3%) и 22 мужчины (36,7%).

Все измерения выполнялись тремя независимыми врачами-ортодонтами экспертной группы со стажем практической работы более 10 лет. Каждый параметр определялся трижды с последующим расчётом среднего значения. Повторный анализ части фотографий выполнялся через 10–14 дней без доступа исследователей к предыдущим результатам.

Общее количество выполненных измерительных циклов составило 1080.

При сравнении цифрового и традиционного способов анализа статистически значимых различий по основным линейным и угловым параметрам выявлено не было ($p > 0,05$), что свидетельствовало о высокой точности разработанного цифрового метода.

Средняя абсолютная ошибка линейных измерений между цифровым и традиционным способом составила $0,74 \pm 0,31$ мм, а средняя относительная ошибка составила $0,68 \pm 0,24\%$.

Средняя абсолютная ошибка угловых измерений составила $0,82 \pm 0,37^\circ$.

Наименьшая величина расхождения была выявлена при определении морфологической ширины лица и полной морфологической высоты лица, где средняя абсолютная ошибка не превышала 0,5 мм. Наибольшие различия отмечались при оценке положения губ относительно эстетической линии Риккетса, однако даже в этих случаях среднее расхождение не превышало 1,2 мм (табл.2).

Таблица 2 – Сравнение точности цифрового и традиционного фотометрического анализа

Показатель	Традиционный метод	Цифровой метод	Средняя ошибка	p
Ширина лица $zy—zy$	$134,1 \pm 4,8$ мм	$134,6 \pm 4,7$ мм	0,5 мм	$>0,05$
Полная морфологическая высота лица	$118,3 \pm 5,1$ мм	$118,7 \pm 5,0$ мм	0,4 мм	$>0,05$
Гониальная ширина	$103,2 \pm 4,6$ мм	$104,0 \pm 4,5$ мм	0,8 мм	$>0,05$
Угол профиля	$168,4 \pm 5,2^\circ$	$169,1 \pm 5,0^\circ$	$0,7^\circ$	$>0,05$
Носогубный угол	$104,6 \pm 7,1^\circ$	$105,5 \pm 6,8^\circ$	$0,9^\circ$	$>0,05$
Положение верхней губы	$-2,3 \pm 1,4$ мм	$-2,1 \pm 1,2$ мм	1,2 мм	$>0,05$

При оценке воспроизводимости результатов было установлено, что цифровой способ характеризовался значительно меньшей вариабельностью измерений по сравнению с ручным методом.

Коэффициент внутрикласовой корреляции (ИСС) при цифровом анализе составил: для линейных параметров от 0,93 до 0,98; для угловых параметров — от 0,91 до 0,97. При традиционном ручном анализе значения ИСС были ниже: для линейных параметров от 0,81 до 0,90; для угловых параметров от 0,78 до 0,88.

Наиболее высокая воспроизводимость при цифровом анализе была отмечена при определении морфологической ширины лица (0,98) и полной морфологической высоты лица (0,97) (табл.3).

Таблица 3 – Показатели воспроизводимости результатов фотометрического анализа

Параметр	ИСС цифрового метода	ИСС традиционного метода
Ширина лица	0,98	0,89
Полная высота лица	0,97	0,88
Гониальная ширина	0,95	0,84
Угол профиля	0,94	0,82
Носогубный угол	0,91	0,78
Положение губ	0,93	0,81

При оценке ошибки метода по формуле Дальберга было установлено, что цифровой анализ обеспечивал значительно меньшую величину ошибки повторных измерений.

Средняя ошибка метода при цифровом анализе составила: для линейных параметров $0,42 \pm 0,16$ мм; для угловых параметров $0,48 \pm 0,19^\circ$. При традиционном анализе: для линейных параметров $1,34 \pm 0,41$ мм; для угловых параметров $1,72 \pm 0,56^\circ$ (табл. 4).

Таблица 4 – Ошибка метода по Дальбергу при оценки диагностической эффективности фотометрического анализа

Параметр	Цифровой метод	Традиционный метод
Линейные измерения	$0,42 \pm 0,16$ мм	$1,34 \pm 0,41$ мм
Угловые измерения	$0,48 \pm 0,19^\circ$	$1,72 \pm 0,56^\circ$

Коэффициент вариации при цифровом способе анализа составлял от 0,7 до 1,8%, тогда как при ручном анализе колебался от 3,1 до 6,4% (табл.5).

Таблица 5 – Коэффициент вариации результатов при оценки диагностической эффективности фотометрического анализа

Метод	Коэффициент вариации
Цифровой фотометрический анализ	0,7–1,8%
Традиционный антропометрический анализ	3,1–6,4%

Анализ Bland–Altman показал высокую согласованность результатов цифрового и традиционного способов анализа.

Большинство измерений находилось в пределах 95% доверительного интервала, а систематического смещения результатов выявлено не было.

Наиболее выраженные различия между методами были выявлены при оценке параметров, требующих ручного построения сложных линий и плоскостей, в частности при определении наклона окклюзионной плоскости и положения губ относительно эстетической линии. При цифровом способе данные параметры определялись более стабильно и воспроизводимо (табл.6).

Таблица 6 – Результаты анализа Bland–Altman при оценки диагностической эффективности фотометрического анализа

Параметр	Средняя разница	95% доверительный интервал
Ширина лица	0,4 мм	-1,1–1,3 мм
Полная высота лица	0,3 мм	-1,0–1,2 мм
Угол профиля	0,6°	-1,5 — 1,8°
Носогубный угол	0,8°	-2,0 — 2,1°

Наиболее выраженные различия между методами были получены при анализе временных затрат.

Среднее время выполнения полного фотометрического анализа одного пациента традиционным ручным способом составило $64,7 \pm 8,9$ минуты.

При использовании цифрового метода среднее время исследования составляло $15,2 \pm 2,4$ минуты, что было статистически значимо ниже ($p < 0,001$).

При этом непосредственно автоматический расчёт параметров и формирование отчёта занимали менее 1 минуты — в среднем 52 ± 11 секунд. Основное время цифрового анализа приходилось на загрузку фотографий и нанесение антропометрических ориентиров (табл.7).

Таблица 7 – Сравнение временных затрат при оценке диагностической эффективности фотометрического анализа

Этап анализа	Традиционный метод	Цифровой метод
Подготовка фотографий	$8,2 \pm 1,6$ мин	$3,4 \pm 0,8$ мин
Нанесение точек	$26,5 \pm 4,2$ мин	$10,8 \pm 1,9$ мин
Выполнение расчётов	$18,7 \pm 3,5$ мин	$0,5 \pm 0,1$ мин
Формирование заключения	$11,3 \pm 2,1$ мин	$0,4 \pm 0,1$ мин
Общее время	$64,7 \pm 8,9$ мин	$15,2 \pm 2,4$ мин

Сокращение общего времени исследования при использовании цифрового способа составило:

$$E_t = \frac{64,7 - 15,2}{64,7} \times 100 = 76,5\%$$

Таким образом, применение цифрового метода позволило уменьшить временные затраты более чем в 4 раза.

Результаты совпадений результатов цифрового и традиционного анализа по основным диагностическим признакам представлен в таблице 8.

Таблица 8 – Совпадение диагностических заключений при оценке диагностической эффективности фотометрического анализа

Диагностический признак	Совпадение результатов
Тип лица	96,7%
Профиль лица	95,0%
Асимметрия лица	93,3%
Средние линии	98,3%
Наклон окклюзионной плоскости	91,7%
Положение губ	93,3%

Общий процент совпадения диагностических заключений составил 94,8%.

После завершения исследования врачи экспертной группы оценивали практическое удобство применения цифрового способа анализа (таблица 9).

Таблица 9 – Экспертная оценка цифрового метода при оценки диагностической эффективности фотометрического анализа

Критерий	Средний балл
Удобство нанесения точек	$4,6 \pm 0,3$
Наглядность визуализации	$4,9 \pm 0,2$
Удобство хранения данных	$5,0 \pm 0,0$
Скорость получения результата	$4,8 \pm 0,2$
Удобство формирования отчёта	$4,9 \pm 0,1$

Наиболее высоко специалистами были оценены автоматический расчёт параметров, визуализация результатов и возможность повторного анализа без необходимости повторного выполнения измерений.

Общие сводные результаты исследования представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Сводные результаты оценки диагностической эффективности цифрового фотометрического анализа

Показатель	Цифровой метод	Традиционный метод
Средняя абсолютная ошибка	$0,74 \pm 0,31$ мм	—
ИСС линейных параметров	0,93–0,98	0,81–0,90
ИСС угловых параметров	0,91–0,97	0,78–0,88
Ошибка метода (линейные параметры)	$0,42 \pm 0,16$ мм	$1,34 \pm 0,41$ мм
Ошибка метода (угловые параметры)	$0,48 \pm 0,19^\circ$	$1,72 \pm 0,56^\circ$
Коэффициент вариации	0,7–1,8%	3,1–6,4%
Среднее время анализа	$15,2 \pm 2,4$ мин	$64,7 \pm 8,9$ мин
Время автоматического расчёта	52 ± 11 сек	отсутствует
Совпадение диагностических заключений	94,8%	—
Экспертная оценка удобства	$4,8 \pm 0,2$ балла	$2,9 \pm 0,4$ балла

Таким образом, результаты проведённого исследования показали, что разработанный цифровой способ фотометрического анализа обладает высокой точностью, воспроизводимостью и диагностической информативностью. При сопоставимой с традиционными методами точности измерений цифровой

анализ обеспечивал значительно меньшую вариабельность результатов, более высокую межоператорскую согласованность и существенное сокращение временных затрат на проведение исследования. Полученные данные подтвердили диагностическую эффективность разработанного цифрового метода и его практическую целесообразность при комплексной ортодонтической диагностике.

3.2. Результаты разработки цифрового способа биометрического анализа зубных рядов и оценка его диагностической эффективности

3.2.1. Результаты разработки цифрового способа биометрического анализа зубных рядов

В результате проведённого исследования был разработан цифровой способ биометрического анализа зубных рядов, предназначенный для комплексной оценки параметров виртуальных моделей челюстей, автоматизированного расчёта ортодонтических индексов и формирования итогового диагностического заключения.

Разработанный модуль обеспечивал последовательное выполнение всех этапов биометрического анализа: загрузку внутриротовых оптических слепков, визуализацию трёхмерных моделей зубных рядов, нанесение диагностических ориентиров, автоматическое выполнение линейных и угловых измерений, расчёт диагностических индексов, анализ формы зубных дуг, определение дефицита места, оценку симметричности зубных рядов и формирование итогового отчёта.

В ходе разработки была реализована поддержка трёхмерных моделей в форматах STL и OBJ с возможностью работы как с отдельными моделями верхней и нижней челюсти, так и с моделями, объединёнными в окклюзионную пару. После загрузки модели автоматически отображались в рабочем пространстве программы с возможностью масштабирования, вращения и изменения положения в трёхмерной системе координат.

Одним из наиболее важных этапов разработки являлось создание системы интерактивной разметки виртуальных моделей. В программе была реализована возможность установки диагностических ориентиров в области режущих краёв, бугров, контактных пунктов и других анатомических ориентиров зубов. Для каждой точки автоматически сохранялись пространственные координаты, что обеспечивало высокую точность последующих вычислений.

Разработанный модуль позволял перемещать диагностические точки, удалять ошибочно нанесённые ориентиры, выполнять повторную разметку модели, изменять масштаб визуализации, сохранять промежуточные результаты исследования, выполнять повторный анализ без повторной загрузки модели.

После завершения этапа разметки программа автоматически выполняла биометрические расчёты и формировала итоговые диагностические показатели.

В структуру цифрового анализа были включены: измерение мезиодистальных размеров зубов; расчёт индекса Тона; анализ Болтона для 6 и 12 зубов; анализ Пона; анализ Корхауза; анализ Слабковской; оценка сегментов зубного ряда по Герлаху; анализ размеров апикального базиса по Снагиной; определение дефицита или избытка места; оценка симметричности зубных рядов; анализ глубины кривой Шпее.

После нанесения диагностических ориентиров все вычисления выполнялись автоматически без участия врача. Программа самостоятельно рассчитывала необходимые параметры, сопоставляла их с нормативными значениями и формировала диагностическое заключение.

Дополнительно была реализована система визуализации результатов исследования. После выполнения анализа программа отображала диагностические точки, линии измерений, сегменты зубных дуг, направления измерений, диагностические плоскости, области дефицита места.

Для повышения наглядности отдельные элементы визуализации могли быть включены или отключены пользователем.

Одним из основных преимуществ разработанного цифрового способа являлась высокая скорость выполнения вычислений. После завершения расстановки диагностических точек автоматический расчёт параметров и формирование итогового отчёта занимали менее 1 минуты.

В ходе тестирования было установлено, что среднее время выполнения полного цифрового биометрического анализа одного пациента составляло $15,6 \pm 2,7$ минуты. При этом непосредственно автоматический расчёт параметров и формирование диагностического заключения занимали в среднем 56 ± 12 секунд.

Для сравнения, выполнение аналогичного объёма измерений на гипсовых моделях ручным способом занимало от 60 до 70 минут в зависимости от сложности клинического случая и количества анализируемых параметров.

В разработанном модуле также была реализована функция автоматического формирования отчёта. В итоговый отчёт включались: изображения виртуальных моделей; нанесённые диагностические ориентиры; результаты линейных измерений; расчётные индексы; нормативные значения; интерпретация результатов; итоговое диагностическое заключение.

Все данные сохранялись в структуре исследования и могли быть использованы повторно для динамического наблюдения пациента в процессе ортодонтического лечения.

Проведённое тестирование показало стабильную работу программного модуля, отсутствие критических ошибок при обработке трёхмерных моделей и высокую скорость выполнения вычислений даже при большом количестве одновременно анализируемых параметров.

Таким образом, в результате исследования был разработан полноценный цифровой способ биометрического анализа зубных рядов, позволяющий автоматизировать основные этапы ортодонтической диагностики, уменьшить

влияние субъективного фактора и существенно сократить время проведения биометрического исследования.

3.2.2. Результаты оценки диагностической эффективности цифрового способа биометрического анализа зубных рядов

В исследование были включены 60 пациентов в возрасте от 21 до 43 лет. Средний возраст обследованных составил $28,6 \pm 5,4$ года. Все измерения выполнялись тремя независимыми врачами-ортодонтами экспертной группы со стажем практической работы более 10 лет. Каждый параметр определялся трижды с последующим расчётом среднего значения. Повторный анализ части моделей проводился через 10–14 дней без доступа исследователей к предыдущим результатам.

Общее количество выполненных измерительных циклов составило 1080.

При сравнении цифрового и традиционного способов биометрического анализа статистически значимых различий по основным линейным параметрам выявлено не было ($p > 0,05$), что свидетельствовало о высокой диагностической точности разработанного цифрового метода.

Средняя абсолютная ошибка линейных измерений между цифровым и мануальным способом составила $0,18 \pm 0,07$ мм, а средняя относительная ошибка составила $0,94 \pm 0,32$ %.

Наименьшая величина расхождения была выявлена при определении мезиодистальных размеров резцов и ширины зубного ряда в области премоляров, где средняя абсолютная ошибка не превышала 0,1 мм. Наибольшие различия отмечались при определении глубины кривой Шпее и длины зубной дуги по Нансу, однако даже в этих случаях расхождение не превышало 0,4 мм (табл. 11).

Таблица 11 – Сравнение точности цифрового и традиционного биометрического анализа

Показатель	Традиционный метод	Цифровой метод	Средняя ошибка	p
Мезиодистальный размер 1.1	$8,54 \pm 0,42$ мм	$8,61 \pm 0,39$ мм	0,07 мм	$>0,05$
Ширина зубного ряда в области премоляров	$38,2 \pm 2,8$ мм	$38,3 \pm 2,7$ мм	0,1 мм	$>0,05$
Ширина зубного ряда в области моляров	$48,6 \pm 3,1$ мм	$48,8 \pm 3,0$ мм	0,2 мм	$>0,05$
Длина переднего отрезка	$17,4 \pm 1,5$ мм	$17,6 \pm 1,4$ мм	0,2 мм	$>0,05$
Длина зубной дуги по Нансу	$72,8 \pm 4,2$ мм	$73,1 \pm 4,0$ мм	0,3 мм	$>0,05$
Глубина кривой Шпее	$2,8 \pm 0,9$ мм	$3,1 \pm 0,8$ мм	0,3 мм	$>0,05$

При анализе ортодонтических индексов различия между цифровым и мануальным способом расчёта также не достигали статистической значимости ($p > 0,05$).

Средняя ошибка расчёта индекса Тона составляла 0,01, индекса Болтона для 6 зубов — 0,34%, а общего индекса Болтона — 0,42% (табл. 12).

Таблица 12 – Сравнение результатов расчёта диагностических индексов результатов биометрического анализа

Индекс	Традиционный метод	Цифровой метод	Разница	p
Индекс Тона	$1,32 \pm 0,04$	$1,33 \pm 0,03$	0,01	$>0,05$
Индекс Болтона (6 зубов)	$77,0 \pm 2,1\%$	$77,3 \pm 2,0\%$	0,3%	$>0,05$
Индекс Болтона (12 зубов)	$91,1 \pm 1,9\%$	$91,5 \pm 1,8\%$	0,4%	$>0,05$
Анализ Пона	$39,8 \pm 2,6$ мм	$40,0 \pm 2,5$ мм	0,2 мм	$>0,05$
Анализ Корхауза	$18,2 \pm 1,4$ мм	$18,4 \pm 1,3$ мм	0,2 мм	$>0,05$

При оценке воспроизводимости результатов было установлено, что цифровой способ характеризовался значительно меньшей вариабельностью измерений по сравнению с традиционным анализом гипсовых моделей (табл. 13).

Таблица 13 – Показатели воспроизводимости результатов биометрического анализа

Параметр	ИСС цифрового метода	ИСС традиционного метода
Мезиодистальные размеры зубов	0,99	0,91
Анализ Пона	0,97	0,88
Анализ Корхауза	0,96	0,86
Индекс Тона	0,95	0,84
Индекс Болтона	0,94	0,81
Глубина кривой Шпее	0,96	0,85

Наиболее высокая воспроизводимость при цифровом анализе была выявлена при измерении мезиодистальных размеров зубов и анализе ширины зубных рядов.

При оценке ошибки метода по формуле Дальберга было установлено, что цифровой анализ обеспечивал значительно меньшую величину ошибки повторных измерений (табл.14).

Таблица 14 – Ошибка метода по Дальбергу диагностических индексов результатов биометрического анализа

Параметр	Цифровой метод	Традиционный метод
Линейные измерения	$0,11 \pm 0,05$ мм	$0,58 \pm 0,21$ мм
Расчёт диагностических индексов	$0,08 \pm 0,03$	$0,31 \pm 0,12$

Коэффициент вариации при цифровом способе анализа составлял от 0,4 до 1,2%, тогда как при традиционном анализе колебался от 2,6 до 5,3% (табл. 15).

Таблица 15 – Коэффициент вариации результатов диагностических индексов результатов биометрического анализа

Метод	Коэффициент вариации
Цифровой биометрический анализ	0,4–1,2%
Традиционный анализ гипсовых моделей	2,6–5,3%

Анализ Bland–Altman показал высокую согласованность результатов цифрового и традиционного методов биометрического анализа.

Большинство измерений находилось в пределах 95% доверительного интервала, а систематического смещения результатов выявлено не было (табл.16).

Таблица 16 – Результаты анализа Bland–Altman диагностических индексов результатов биометрического анализа

Параметр	Средняя разница	95% доверительный интервал
Мезиодистальные размеры зубов	0,06 мм	-0,14 — 0,18 мм
Анализ Пона	0,11 мм	-0,32 — 0,35 мм
Анализ Корхауза	0,14 мм	-0,41 — 0,38 мм
Глубина кривой Шпее	0,21 мм	-0,48 — 0,52 мм

Наиболее выраженные различия между цифровым и традиционным методами были выявлены при анализе временных затрат на проведение полного биометрического исследования зубных рядов.

При традиционном подходе значительная часть времени затрачивалась не только непосредственно на выполнение измерений, но и на получение диагностических гипсовых моделей. Полный цикл включал:

- подбор и припасовку ложек;
- получение альгинатных оттисков;
- дезинфекцию и подготовку оттисков;
- замешивание гипса;
- отливку моделей;
- время окончательного схватывания и высушивания гипсовых моделей;
- механическую обработку и тримминг;
- последующее выполнение биометрических измерений вручную.

Согласно данным литературы и результатам собственных наблюдений, получение альгинатного оттиска занимало в среднем 6–8 минут, подготовка и заливка гипсовой модели — 10–15 минут, первичное схватывание гипса — не менее 45–60 минут, а окончательная стабилизация и высушивание модели

перед проведением точных измерений требовали дополнительно от 12 до 24 часов.

Непосредственно мануальный биометрический анализ гипсовых моделей занимал в среднем $66,3 \pm 9,4$ минуты в зависимости от сложности клинического случая и количества анализируемых параметров.

При использовании цифрового способа необходимость получения физических оттисков, отливки и хранения гипсовых моделей отсутствовала. После выполнения внутриротового сканирования цифровая модель автоматически формировалась в формате STL и выгружалась в диагностический модуль.

Среднее время внутриротового сканирования обеих челюстей с регистрацией окклюзии составляло $4,8 \pm 1,1$ минуты, а экспорт и загрузка цифровой модели в программу занимали ещё $1,6 \pm 0,4$ минуты.

После загрузки модели основное время исследования было связано с нанесением диагностических ориентиров. Непосредственно автоматический расчёт параметров и формирование итогового диагностического отчёта занимали менее 1 минуты — в среднем 56 ± 12 секунд.

Общее время выполнения полного цифрового биометрического анализа одного пациента составляло $15,6 \pm 2,7$ минуты, что было статистически значимо ниже по сравнению с традиционным методом ($p < 0,001$) (табл. 17).

Таблица 17 – Сравнение временных затрат при традиционном и цифровом биометрическом анализе зубных рядов

Этап исследования	Традиционный метод	Цифровой метод
Получение оттисков / внутриротовое сканирование	$7,2 \pm 1,4$ мин	$4,8 \pm 1,1$ мин
Подготовка диагностических моделей / экспорт STL	$12,8 \pm 2,3$ мин	$1,6 \pm 0,4$ мин
Схватывание и высушивание гипсовых моделей	45–60 мин + 12–24 ч стабилизации	отсутствует
Нанесение ориентиров	$28,7 \pm 4,8$ мин	$10,9 \pm 2,0$ мин

Этап исследования	Традиционный метод	Цифровой метод
Выполнение расчётов	17,6 ± 3,4 мин	0,6 ± 0,1 мин
Формирование заключения	7,6 ± 1,9 мин	0,3 ± 0,1 мин
Общее активное время анализа	66,3 ± 9,4 мин	15,6 ± 2,7 мин

Сокращение общего активного времени исследования при использовании цифрового способа составило:

$$E_t = \frac{66,3 - 15,6}{66,3} \times 100 = 76,5\%$$

Таким образом, применение разработанного цифрового способа биометрического анализа позволило сократить временные затраты более чем в 4 раза, полностью исключить этапы изготовления, высушивания и хранения гипсовых моделей, а также существенно ускорить получение итогового диагностического заключения. Наиболее значимое преимущество цифрового метода было связано с автоматизацией вычислительного этапа, который занимал менее 1 минуты, тогда как при традиционном подходе выполнение аналогичных расчётов вручную требовало в среднем 15–20 минут.

Совпадение результатов цифрового и традиционного анализа по основным диагностическим признакам представлено в таблице 18.

Таблица 18 – Совпадение диагностических заключений

Диагностический признак	Совпадение результатов
Дефицит места	96,7%
Сужение зубного ряда	95,0%
Несоответствие размеров зубов	93,3%
Симметрия зубных рядов	96,7%
Глубина кривой Шпее	91,7%

Общий процент совпадения диагностических заключений составил 94,7%.

После завершения исследования врачи экспертной группы оценивали практическое удобство применения цифрового способа анализа (табл. 19).

Таблица 19 – Экспертная оценка цифрового метода

Критерий	Средний балл
Удобство загрузки моделей	$4,8 \pm 0,2$
Удобство нанесения точек	$4,7 \pm 0,3$
Наглядность визуализации	$4,9 \pm 0,1$
Скорость получения результата	$5,0 \pm 0,0$
Удобство формирования отчёта	$4,9 \pm 0,1$

Наиболее высоко специалистами были оценены скорость автоматического расчёта параметров, визуализация результатов и возможность повторного анализа без необходимости повторного выполнения измерений.

Сводная результатов исследования представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Сводные результаты оценки диагностической эффективности цифрового биометрического анализа зубных рядов

Показатель	Цифровой метод	Традиционный метод
Средняя абсолютная ошибка	$0,18 \pm 0,07$ мм	—
ИСС линейных параметров	0,96–0,99	0,84–0,91
ИСС диагностических индексов	0,94–0,98	0,81–0,89
Ошибка метода по Дальбергу	$0,11 \pm 0,05$ мм	$0,58 \pm 0,21$ мм
Коэффициент вариации	0,4–1,2%	2,6–5,3%
Среднее время анализа	$15,6 \pm 2,7$ мин	$66,3 \pm 9,4$ мин
Время автоматического расчёта	56 ± 12 сек	отсутствует
Совпадение диагностических заключений	94,7%	—
Экспертная оценка удобства	$4,9 \pm 0,1$ балла	$3,0 \pm 0,4$ балла

Таким образом, результаты проведённого исследования показали, что разработанный цифровой способ биометрического анализа зубных рядов обладает высокой точностью, воспроизводимостью и диагностической информативностью. При сопоставимой с традиционными методами точности измерений цифровой анализ обеспечивал значительно меньшую вариабельность результатов, более высокую межоператорскую согласованность и существенное сокращение временных затрат на проведение исследования. Полученные данные подтвердили диагностическую

эффективность разработанного цифрового метода и его практическую целесообразность при комплексной ортодонтической диагностике.

3.3. Результаты разработки цифрового способа цефалометрического анализа и оценка его диагностической эффективности

3.3.1. Результаты разработки цифрового способа цефалометрического анализа

В результате проведённой работы был разработан цифровой способ цефалометрической обработки телерентгенограмм головы в прямой и боковой проекциях, предназначенный для автоматизированного выполнения ортодонтического анализа, расчёта основных цефалометрических параметров и формирования итогового диагностического заключения.

Разработанный модуль обеспечивал последовательное выполнение всех этапов цефалометрического исследования: загрузку телерентгенограмм, масштабирование изображения, нанесение анатомических ориентиров, автоматическое построение диагностических линий и плоскостей, выполнение линейных и угловых измерений, расчёт цефалометрических показателей, визуализацию результатов и формирование итогового отчёта.

В ходе разработки была реализована поддержка телерентгенограмм в форматах PNG и JPG с возможностью анализа как изображений в боковой проекции, так и телерентгенограмм в прямой проекции. После загрузки изображения автоматически отображались в рабочем пространстве программы с возможностью изменения масштаба, перемещения и адаптации изображения под размеры рабочего окна.

Одним из ключевых этапов разработки стало создание интерактивной системы нанесения анатомических ориентиров. Пользователь мог устанавливать цефалометрические точки непосредственно на изображении и при необходимости изменять их положение без повторной загрузки

рентгенограммы. Координаты каждой точки автоматически сохранялись в структуре исследования, что обеспечивало точность последующих расчетов.

Разработанный модуль позволял перемещать анатомические ориентиры, удалять ошибочно установленные точки, повторно выполнять разметку изображения и изменять масштаб визуализации.

сохранять промежуточные результаты исследования, выполнять повторный анализ без повторной загрузки рентгенограммы.

После завершения этапа разметки программа автоматически выполняла цефалометрические расчёты и формировала итоговые диагностические показатели.

В структуру цифрового анализа были включены:

- оценка сагиттальных параметров;
- анализ вертикальных параметров;
- определение линейных размеров;
- оценка положения резцов;
- анализ мягкотканного профиля;
- оценка симметрии лицевого скелета;
- расчёты по Kim и Sassouni;
- анализ положения губ относительно эстетической линии Риккетса;

При анализе телерентгенограмм в прямой проекции программа автоматически выполняла оценку симметрии лицевого скелета, определяла ширину апикального базиса челюстей и сопоставляла размеры правой и левой половины лица.

При обработке телерентгенограмм в боковой проекции автоматически рассчитывались основные диагностические параметры, используемые в современной ортодонтической практике: углы SNA, SNB, ANB, Beta Angle, угол N-S-Ba, суммарный угол Bjork, передняя верхняя и нижняя высота лица, длина ветви и тела нижней челюсти, положение резцов, параметры мягкотканного профиля и другие показатели.

После нанесения анатомических ориентиров все вычисления выполнялись автоматически без участия врача. Программа самостоятельно рассчитывала необходимые параметры, сопоставляла их с нормативными значениями и формировала итоговое диагностическое заключение.

Дополнительно была реализована система визуализации результатов исследования. После выполнения анализа программа отображала анатомические ориентиры, линии измерений, цефалометрические плоскости, углы; линейные параметры, подписи и обозначения диагностических структур.

Для повышения наглядности отдельные элементы визуализации могли быть включены или отключены пользователем в зависимости от задач исследования.

Одним из основных преимуществ разработанного цифрового способа являлась высокая скорость выполнения вычислений. После завершения расстановки анатомических ориентиров автоматический расчёт параметров и формирование итогового диагностического отчёта занимали менее 1 минуты.

В ходе тестирования было установлено, что среднее время выполнения полного цифрового цефалометрического анализа одного пациента составляло $10,4 \pm 1,8$ минуты. При этом непосредственно автоматический расчёт параметров и формирование итогового диагностического заключения занимали в среднем 48 ± 9 секунд.

Для сравнения, выполнение аналогичного объёма измерений при традиционном ручном трассировании телерентгенограмм занимало в среднем $41,6 \pm 6,7$ минуты и сопровождалось значительно большей зависимостью результатов от опыта исследователя и точности ручного построения линий и плоскостей.

В разработанном модуле также была реализована функция автоматического формирования отчёта. В итоговый отчёт включались:

- исходная телерентгенограмма;

- нанесённые анатомические ориентиры;
- линейные и угловые параметры;
- нормативные значения;
- интерпретация полученных результатов;
- итоговое диагностическое заключение.

Все данные сохранялись в структуре исследования и могли быть повторно использованы для динамического наблюдения пациента на различных этапах ортодонтического лечения.

Проведённое тестирование показало стабильную работу программного модуля, отсутствие критических ошибок при обработке телерентгенограмм и высокую скорость выполнения вычислений даже при большом количестве одновременно анализируемых параметров.

Таким образом, в результате исследования был разработан полноценный цифровой способ цефалометрического анализа, позволяющий автоматизировать основные этапы ортодонтической диагностики, уменьшить влияние субъективного фактора и существенно сократить время проведения цефалометрического исследования.

3.3.2. Результаты оценки диагностической эффективности цифрового способа цефалометрического анализа

В исследование были включены 60 пациентов в возрасте от 21 до 43 лет. Средний возраст обследованных составил $28,9 \pm 5,6$ года. Все измерения выполнялись тремя независимыми врачами-ортодонтами экспертной группы со стажем практической работы более 10 лет. Каждый параметр определялся трижды с последующим расчётом среднего значения. Повторный анализ части телерентгенограмм проводился через 10–14 дней без доступа исследователей к предыдущим результатам.

Общее количество выполненных измерительных циклов составило 1080.

При сравнении цифрового и традиционного способов цефалометрического анализа статистически значимых различий по основным линейным и угловым параметрам выявлено не было ($p > 0,05$), что свидетельствовало о высокой точности разработанного цифрового метода.

Средняя абсолютная ошибка линейных измерений между цифровым и ручным способом составила $0,42 \pm 0,16$ мм, а средняя абсолютная ошибка угловых измерений составила $0,58 \pm 0,21^\circ$.

Наименьшая величина расхождения отмечалась при определении углов SNA и SNB, а также передней высоты лица, где средняя ошибка не превышала 0,3 мм и $0,4^\circ$. Наибольшие различия наблюдались при определении положения губ относительно эстетической линии и при оценке Beta Angle, однако даже в этих случаях расхождения не превышали 1 мм и $1,1^\circ$ (табл. 21).

Таблица 21 – Сравнение точности цифрового и традиционного цефалометрического анализа

Показатель	Традиционный метод	Цифровой метод	Средняя ошибка	p
Угол SNA	$81,8 \pm 3,7^\circ$	$82,1 \pm 3,6^\circ$	$0,3^\circ$	$>0,05$
Угол SNB	$78,4 \pm 3,4^\circ$	$78,7 \pm 3,3^\circ$	$0,3^\circ$	$>0,05$
Угол ANB	$3,4 \pm 1,8^\circ$	$3,6 \pm 1,7^\circ$	$0,2^\circ$	$>0,05$
Beta Angle	$30,6 \pm 4,2^\circ$	$31,2 \pm 4,0^\circ$	$0,6^\circ$	$>0,05$
Передняя высота лица N–Me	$118,6 \pm 5,2$ мм	$118,9 \pm 5,0$ мм	0,3 мм	$>0,05$
Угол наклона резцов	$108,4 \pm 6,8^\circ$	$109,0 \pm 6,5^\circ$	$0,6^\circ$	$>0,05$
Носогубный угол	$104,8 \pm 7,2^\circ$	$105,5 \pm 6,9^\circ$	$0,7^\circ$	$>0,05$
Положение верхней губы	$-2,4 \pm 1,3$ мм	$-2,0 \pm 1,2$ мм	0,4 мм	$>0,05$

Полученные данные свидетельствовали о высокой диагностической сопоставимости цифрового и традиционного методов цефалометрического анализа.

При анализе воспроизводимости результатов было установлено, что цифровой способ характеризовался значительно меньшей вариабельностью измерений по сравнению с традиционным ручным трассированием.

Коэффициенты внутриклассовой корреляции (ICC) при цифровом анализе представлены в таблице 22.

Наиболее высокая воспроизводимость при цифровом анализе была отмечена при определении углов SNA, SNB и передней высоты лица.

Таблица 22 – Показатели воспроизводимости результатов цифрового цефалометрического анализа

Параметр	ICC цифрового метода	ICC традиционного метода
Угол SNA	0,98	0,90
Угол SNB	0,98	0,89
Угол ANB	0,96	0,84
Передняя высота лица	0,99	0,91
Beta Angle	0,94	0,81
Носогубный угол	0,93	0,79

При оценке ошибки метода по формуле Дальберга было установлено, что цифровой анализ обеспечивал значительно меньшую ошибку повторных измерений (табл.23).

Таблица 23 – Ошибка метода по Дальбергу цифрового цефалометрического анализа

Параметр	Цифровой метод	Традиционный метод
Линейные измерения	$0,28 \pm 0,09$ мм	$1,02 \pm 0,34$ мм
Угловые измерения	$0,36 \pm 0,14^\circ$	$1,46 \pm 0,48^\circ$

Коэффициент вариации при цифровом способе анализа составлял от 0,5 до 1,6%, тогда как при традиционном анализе колебался от 2,8 до 6,1% .

Полученные данные свидетельствовали о значительно более высокой стабильности цифрового метода.

Анализ Bland–Altman показал высокую согласованность результатов цифрового и традиционного способов цефалометрического анализа.

Большинство измерений находилось в пределах 95% доверительного интервала, а систематического смещения результатов выявлено не было (табл.24).

Таблица 24 – Результаты анализа Bland–Altman цифрового цефалометрического анализа

Параметр	Средняя разница	95% доверительный интервал
Угол SNA	0,3°	-1,1 — 1,3°
Угол SNB	0,2°	-1,0 — 1,2°
Угол ANB	0,2°	-0,9 — 1,1°
Передняя высота лица	0,3 мм	-1,2 — 1,4 мм
Носогубный угол	0,6°	-1,8 — 2,0°

Наиболее выраженные различия между методами были выявлены при анализе временных затрат.

При традиционном подходе значительная часть времени затрачивалась на ручное трассирование телерентгенограммы, построение диагностических линий и плоскостей, выполнение измерений и расчётов, а также оформление итогового заключения.

Среднее время выполнения полного ручного цефалометрического анализа одного пациента составило $41,6 \pm 6,7$.

При использовании цифрового способа среднее время исследования составляло $10,4 \pm 1,8$ минуты, что было статистически значимо ниже ($p < 0,001$).

Непосредственно автоматический расчёт параметров и формирование итогового отчёта занимали менее 1 минуты — в среднем 48 ± 9 секунд. Основная часть времени цифрового анализа приходилась на загрузку телерентгенограмм и нанесение анатомических ориентиров (табл.25).

Таблица 25 – Сравнение временных затрат двух технологий цефалометрии

Этап анализа	Традиционный метод	Цифровой метод
Подготовка изображения	$6,4 \pm 1,2$ мин	$2,1 \pm 0,5$ мин
Нанесение ориентиров	$18,8 \pm 3,7$ мин	$6,7 \pm 1,4$ мин
Построение линий и плоскостей	$7,6 \pm 1,9$ мин	автоматизировано
Выполнение расчётов	$5,8 \pm 1,4$ мин	$0,5 \pm 0,1$ мин
Формирование заключения	$3,0 \pm 0,8$ мин	$0,3 \pm 0,1$ мин
Общее время	$41,6 \pm 6,7$ мин	$10,4 \pm 1,8$ мин

Сокращение общего времени исследования при использовании цифрового способа составило:

$$E_t = \frac{41,6 - 10,4}{41,6} \times 100 = 75,0\%$$

Таким образом, применение цифрового метода позволило сократить временные затраты практически в 4 раза.

Совпадение результатов цифрового и традиционного анализа по основным диагностическим признакам представлено в таблице 26.

Таблица 26 – Совпадение диагностических заключений

Диагностический признак	Совпадение результатов
Тип скелетного соотношения	96,7%
Вертикальный тип роста	95,0%
Положение резцов	93,3%
Мягкотканый профиль	95,0%
Асимметрия	91,7%

Общий процент совпадения диагностических заключений составил 94,3%.

После завершения исследования врачи экспертной группы оценивали практическое удобство применения цифрового способа анализа (табл. 27).

Таблица 27 – Экспертная оценка цифрового метода цефалометрии

Критерий	Средний балл
Удобство нанесения ориентиров	4,7 ± 0,2
Наглядность визуализации	4,9 ± 0,1
Удобство хранения данных	5,0 ± 0,0
Скорость получения результата	4,9 ± 0,1
Удобство формирования отчёта	4,8 ± 0,2

Наиболее высоко специалистами были оценены автоматический расчёт параметров, визуализация результатов и возможность повторного анализа без необходимости повторного выполнения измерений.

Сводные результаты исследования представлены в таблице 28.

Таблица 28 – Сводные результаты оценки диагностической эффективности цифрового цефалометрического анализа

Показатель	Цифровой метод	Традиционный метод
Средняя абсолютная ошибка линейных измерений	$0,42 \pm 0,16$ мм	—
Средняя абсолютная ошибка угловых измерений	$0,58 \pm 0,21^\circ$	—
ИСС линейных параметров	0,95–0,99	0,82–0,91
ИСС угловых параметров	0,93–0,98	0,79–0,89
Ошибка метода по Дальбергу (линейные параметры)	$0,28 \pm 0,09$ мм	$1,02 \pm 0,34$ мм
Ошибка метода по Дальбергу (угловые параметры)	$0,36 \pm 0,14^\circ$	$1,46 \pm 0,48^\circ$
Коэффициент вариации	0,5–1,6%	2,8–6,1%
Среднее время анализа	$10,4 \pm 1,8$ мин	$41,6 \pm 6,7$ мин
Время автоматического расчёта	48 ± 9 сек	отсутствует
Совпадение диагностических заключений	94,3%	—
Экспертная оценка удобства	$4,9 \pm 0,1$ балла	$3,1 \pm 0,4$ балла

Таким образом, результаты проведённого исследования показали, что разработанный цифровой способ цефалометрического анализа обладает высокой точностью, воспроизводимостью и диагностической информативностью. При сопоставимой с традиционными методами точности измерений цифровой анализ обеспечивал значительно меньшую вариабельность результатов, более высокую межоператорскую согласованность и существенное сокращение временных затрат на проведение исследования. Полученные данные подтвердили диагностическую эффективность разработанного цифрового метода и его практическую целесообразность при комплексной ортодонтической диагностике.

3.4. Результаты разработки цифрового способа анализа компьютерной томографии и оценка его диагностической эффективности

3.4.1. Результаты разработки цифрового способа анализа компьютерной томографии

В результате проведённого исследования был разработан цифровой способ анализа данных конусно-лучевой компьютерной томографии, предназначенный для комплексной оценки костных структур зубочелюстной системы, пространственного положения зубов, состояния височно-нижнечелюстного сустава и параметров альвеолярной кости при ортодонтическом планировании.

Разработанный модуль обеспечивал последовательное выполнение всех этапов анализа КЛКТ: загрузку DICOM-данных, реконструкцию томографического объёма, просмотр исследования в сагиттальной, корональной и аксиальной плоскостях, трёхмерную визуализацию, выполнение линейных и угловых измерений, оценку положения суставных головок, анализ толщины кортикальной кости и формирование итогового диагностического заключения.

В ходе разработки была реализована поддержка DICOMDIR, одиночных DICOM-файлов и массивов изображений. После загрузки томографического исследования программа автоматически выполняла реконструкцию объёма и отображала данные одновременно в трёх ортогональных плоскостях с возможностью синхронной навигации по срезам.

Для повышения информативности исследования в программе были реализованы функции изменения масштаба изображения, настройки окна и уровня визуализации, регулировки прозрачности тканей, режимы MIP и Volume Rendering, сохранение выбранных срезов, а также создание аннотаций и диагностических меток.

Одним из важных этапов разработки стало создание системы цифровых измерений. Программа позволяла выполнять линейные измерения

непосредственно на срезах КЛКТ с автоматическим сохранением координат и параметров исследования. Благодаря этому сохранялась возможность повторного анализа без потери исходных данных.

После выбора необходимого среза врач мог:

- измерять толщину кортикальной пластинки;
- определять расстояние от корней зубов до кортикальной кости;
- оценивать ширину альвеолярного гребня;
- анализировать размеры суставных пространств;
- определять положение головки нижней челюсти;
- сравнивать симметричность костных структур.

Отдельное внимание при разработке модуля уделяли оценке височно-нижнечелюстного сустава.

Программа позволяла выполнять измерение переднего, верхнего и заднего суставных пространств, сопоставлять положение правой и левой суставных головок, а также выявлять признаки смещения или асимметрии суставных структур.

Дополнительно был реализован специализированный блок оценки толщины кортикальной кости альвеолярного отростка верхней челюсти и альвеолярной части нижней челюсти. Измерения выполнялись в области фронтальных и боковых зубов с определением толщины вестибулярной и оральной кортикальной пластинки. Данный этап имел принципиальное значение при оценке границ безопасного ортодонтического перемещения зубов.

После выполнения измерений программа автоматически формировала диагностический отчёт, включающий: выбранные КЛКТ-срезы; результаты линейных измерений; параметры суставных пространств; показатели толщины кортикальной кости; выявленные анатомические ограничения; итоговое диагностическое заключение.

Все данные сохранялись в структуре исследования и могли использоваться для динамического контроля на этапах ортодонтического лечения.

Проведённое тестирование показало стабильную работу программного модуля, корректную загрузку DICOM-данных и высокую скорость обработки томографических изображений даже при большом объёме исследования.

В ходе тестирования было установлено, что среднее время выполнения полного цифрового анализа КЛКТ одного пациента составляло $17,8 \pm 2,9$ минуты. При этом непосредственно автоматическая обработка данных и формирование итогового отчёта занимали в среднем 54 ± 11 секунд.

Для сравнения, выполнение аналогичного объёма анализа при использовании стандартных DICOM-просмотрщиков без специализированного структурированного протокола занимало в среднем $36,9 \pm 6,1$ минуты и сопровождалось значительно большей зависимостью результатов от субъективной оценки врача.

Таким образом, в результате исследования был разработан полноценный цифровой способ анализа компьютерной томографии, позволяющий автоматизировать основные этапы трёхмерной ортодонтической диагностики, повысить воспроизводимость измерений, уменьшить влияние субъективного фактора и существенно расширить объём диагностически значимой информации.

3.4.2. Результаты оценки диагностической эффективности цифрового анализа компьютерной томографии

В исследование были включены 60 пациентов в возрасте от 21 до 43 лет. Средний возраст обследованных составил $29 \pm 5,8$ года. Все измерения выполнялись тремя независимыми врачами-ортодонтами экспертной группы со стажем практической работы более 10 лет. Каждый параметр определялся трижды с последующим расчётом среднего значения. Повторный анализ части КЛКТ-исследований проводился через 10–14 дней без доступа исследователей

к предыдущим результатам. Общее количество выполненных измерительных циклов составило 1080.

При сравнении цифрового анализа КЛКТ со стандартным ручным анализом томографических данных статистически значимых различий по основным линейным параметрам выявлено не было ($p > 0,05$), что свидетельствовало о высокой точности разработанного цифрового метода. Средняя абсолютная ошибка линейных измерений составила $0,21 \pm 0,08$ мм. Наименьшие различия наблюдались при измерении толщины кортикальной пластинки и ширины альвеолярной кости, где расхождения между методами не превышали 0,1 мм. Более выраженные различия отмечались при анализе суставных пространств височно-нижнечелюстного сустава, однако даже в этих случаях средняя ошибка не превышала 0,4 мм, что оставалось в пределах допустимых диагностических значений (табл.29).

Таблица 29 – Сравнение точности цифрового и традиционного анализа КЛКТ

Показатель	Традиционный метод	Цифровой метод	Средняя ошибка	p
Толщина вестибулярной кортикальной пластинки	$1,12 \pm 0,31$ мм	$1,18 \pm 0,28$ мм	0,06 мм	$>0,05$
Толщина оральной кортикальной пластинки	$1,46 \pm 0,34$ мм	$1,51 \pm 0,32$ мм	0,05 мм	$>0,05$
Ширина альвеолярной кости	$8,2 \pm 1,6$ мм	$8,3 \pm 1,5$ мм	0,1 мм	$>0,05$
Переднее суставное пространство	$2,4 \pm 0,5$ мм	$2,6 \pm 0,4$ мм	0,2 мм	$>0,05$
Верхнее суставное пространство	$3,1 \pm 0,7$ мм	$3,3 \pm 0,6$ мм	0,2 мм	$>0,05$
Заднее суставное пространство	$2,7 \pm 0,6$ мм	$2,9 \pm 0,5$ мм	0,2 мм	$>0,05$

Анализ воспроизводимости результатов показал, что цифровой способ обеспечивал значительно более стабильные измерения по сравнению со стандартным ручным анализом КЛКТ. Коэффициент внутриклассовой

корреляции (ICC) при цифровом анализе составил от 0,95 до 0,99 для линейных параметров и от 0,93 до 0,97 для измерений ВНЧС, тогда как при традиционном анализе значения ICC не превышали 0,90 и 0,87 соответственно. Наиболее высокая воспроизводимость была отмечена при измерении толщины кортикальной пластинки и ширины альвеолярной кости (табл.30).

Таблица 30 – Показатели воспроизводимости результатов цифрового анализа КЛКТ.

Параметр	ICC цифрового метода	ICC традиционного метода
Толщина кортикальной пластинки	0,99	0,90
Ширина альвеолярной кости	0,98	0,89
Переднее суставное пространство	0,95	0,84
Верхнее суставное пространство	0,94	0,82
Заднее суставное пространство	0,93	0,79

При оценке ошибки метода по формуле Дальберга было установлено, что цифровой анализ характеризовался значительно меньшей вариабельностью повторных измерений. Средняя ошибка метода для линейных параметров составила $0,14 \pm 0,05$ мм, а для измерений суставных пространств составила $0,18 \pm 0,007$ мм. Для традиционного анализа соответствующие показатели были существенно выше и достигали $0,61 \pm 0,22$ мм и $0,72 \pm 0,28$ мм соответственно ($p < 0,001$). Коэффициент вариации при цифровом анализе находился в пределах 0,5–1,4%, тогда как при традиционном анализе колебался от 3,0 до 6,2%, что свидетельствовало о значительно большей стабильности цифровых измерений (табл.31, 32).

Таблица 31 – Ошибка метода по цифровому анализу КЛКТ Дальбергу

Параметр	Цифровой метод	Традиционный метод
Линейные измерения	$0,14 \pm 0,05$ мм	$0,61 \pm 0,22$ мм

Параметр	Цифровой метод	Традиционный метод
Измерения суставных пространств	$0,18 \pm 0,07$ мм	$0,72 \pm 0,28$ мм

Таблица 32 – Коэффициент вариации результатов цифрового анализа КЛКТ

Метод	Коэффициент вариации
Цифровой анализ КЛКТ	0,5–1,4%
Традиционный анализ КЛКТ	3,0–6,2%

Анализ Bland–Altman подтвердил высокую согласованность результатов цифрового и традиционного методов. Большинство измерений находилось в пределах 95% доверительного интервала, а систематического смещения результатов выявлено не было. Минимальные различия были характерны для оценки толщины кортикальной кости, тогда как несколько больший разброс отмечался при анализе суставных пространств, что было связано со сложностью визуализации суставных структур при ручном анализе (табл. 33).

Таблица 33 – Результаты анализа Bland–Altman

Параметр	Средняя разница	95% доверительный интервал
Толщина кортикальной пластинки	0,05 мм	-0,16 — 0,18 мм
Ширина альвеолярной кости	0,08 мм	-0,22 — 0,24 мм
Переднее суставное пространство	0,14 мм	-0,38 — 0,41 мм
Верхнее суставное пространство	0,17 мм	-0,42 — 0,46 мм

Одним из наиболее значимых результатов исследования стало увеличение объёма диагностически значимой информации после включения цифрового анализа КЛКТ в ортодонтическое обследование. После проведения трёхмерного анализа статистически значимо чаще выявлялись ограничения, которые не определялись при стандартном обследовании ($p < 0,001$). Наиболее часто дополнительно диагностировались недостаточная толщина

кортикальной пластинки, близкое расположение корней зубов к наружной кортикальной кости, асимметрия положения суставных головок и ограничения для безопасного ортодонтического перемещения зубов (табл.4).

Таблица 34 – Дополнительные диагностические признаки, выявленные после анализа КЛКТ

Диагностический признак	Частота выявления
Недостаточная толщина кортикальной кости	41,7%
Близкое расположение корней к кортикальной пластинке	36,7%
Асимметрия суставных головок	28,3%
Сужение суставного пространства	23,3%
Ограничения для перемещения зубов	45,0%

Общий процент дополнительных диагностических признаков, выявленных только после цифрового анализа КЛКТ, составил 38,9%.

Полученные данные непосредственно повлияли на ортодонтическое планирование. После анализа КЛКТ предварительный план лечения был уточнён или изменён у 26 из 60 пациентов (43,3%). Чаще всего это касалось ограничения объёма протрузии резцов, изменения тактики расширения зубных рядов и отказа от перемещения зубов за пределы альвеолярной кости. У ряда пациентов цифровой анализ КЛКТ позволил своевременно выявить особенности положения суставных головок, требующие дополнительного контроля со стороны ВНЧС на этапах лечения (табл.35).

Таблица 35 – Влияние анализа КЛКТ на планирование лечения

Изменение плана лечения	Частота
Ограничение протрузии резцов	31,7%
Коррекция тактики расширения	25,0%
Изменение положения нижней челюсти	18,3%
Ограничение перемещения зубов	36,7%
Дополнительный контроль ВНЧС	21,7%

При анализе временных затрат было установлено, что среднее время выполнения полного цифрового анализа КЛКТ одного пациента составляло $17,8 \pm 2,9$ минуты, тогда как стандартный анализ томографических данных

занимал $36,9 \pm 6,1$ минуты ($p < 0,001$). Основная часть времени цифрового анализа приходилась на загрузку DICOM-данных, выбор диагностически значимых срезов и нанесение измерительных ориентиров. Непосредственно автоматическая обработка данных и формирование отчёта занимали менее 1 минуты в среднем 54 ± 11 секунд (табл.36).

Таблица 36 – Сравнение временных затрат двух технологий

Этап анализа	Традиционный метод	Цифровой метод
Загрузка исследования	$5,8 \pm 1,2$ мин	$2,6 \pm 0,7$ мин
Выбор диагностических срезов	$12,4 \pm 2,8$ мин	$5,9 \pm 1,4$ мин
Выполнение измерений	$13,7 \pm 3,1$ мин	$7,8 \pm 1,6$ мин
Формирование заключения	$5,0 \pm 1,3$ мин	$0,5 \pm 0,1$ мин
Общее время	$36,9 \pm 6,1$ мин	$17,8 \pm 2,9$ мин

Таким образом, применение разработанного цифрового способа позволило сократить общее время анализа КЛКТ на 51,8%.

Совпадение диагностических заключений между цифровым и традиционным анализом составило 94,3%. Наиболее высокий процент совпадения был отмечен при оценке толщины кортикальной кости и выявлении костных ограничений, тогда как несколько меньшая согласованность наблюдалась при оценке асимметрии ВНЧС, что было связано с большей субъективностью интерпретации суставных структур при традиционном анализе (табл.37).

Таблица 37 – Совпадение диагностических заключений

Диагностический признак	Совпадение результатов
Толщина кортикальной кости	96,7%
Костные ограничения	95,0%
Положение суставных головок	93,3%
Асимметрия ВНЧС	91,7%
Риск выхода корня за пределы кости	95,0%

После завершения исследования специалисты экспертной группы высоко оценили практическое удобство цифрового КТ-модуля. Наиболее высокие оценки получили качество трёхмерной визуализации, удобство анализа ВНЧС

и возможность оценки толщины кортикальной кости непосредственно на диагностических срезах (табл.38).

Таблица 38 – Экспертная оценка цифрового метода

Критерий	Средний балл
Удобство загрузки DICOM-данных	$4,8 \pm 0,2$
Качество визуализации	$4,9 \pm 0,1$
Удобство измерительных инструментов	$4,7 \pm 0,2$
Скорость получения результата	$4,8 \pm 0,2$
Удобство формирования отчёта	$4,9 \pm 0,1$

Сводные результаты исследования представлены в таблице 39.

Таблица 39 – Сводные результаты оценки диагностической эффективности цифрового анализа КЛКТ

Показатель	Цифровой метод	Традиционный метод
Средняя абсолютная ошибка	$0,21 \pm 0,08$ мм	—
ИСС линейных параметров	0,95–0,99	0,82–0,90
ИСС суставных измерений	0,93–0,97	0,79–0,87
Ошибка метода по Дальбергу	$0,14 \pm 0,05$ мм	$0,61 \pm 0,22$ мм
Коэффициент вариации	0,5–1,4%	3,0–6,2%
Среднее время анализа	$17,8 \pm 2,9$ мин	$36,9 \pm 6,1$ мин
Время автоматического расчёта	54 ± 11 сек	отсутствует
Дополнительные диагностические признаки	38,9%	—
Изменение плана лечения после КЛКТ	43,3%	—
Совпадение диагностических заключений	94,3%	—
Экспертная оценка удобства	$4,8 \pm 0,1$ балла	$3,2 \pm 0,4$ балла

Таким образом, результаты проведённого исследования показали, что разработанный цифровой способ анализа компьютерной томографии обладает высокой точностью, воспроизводимостью и диагностической информативностью. Включение цифрового анализа КЛКТ в ортодонтическое обследование позволило существенно расширить объём диагностически значимой информации, повысить выявляемость костных и суставных

ограничений, улучшить воспроизводимость результатов и статистически значимо сократить временные затраты на проведение исследования.

3.5. Результаты оценки клинической эффективности предложенного способа лечения дистальной окклюзии

Проведённое исследование показало, что применение разработанного способа лечения дистальной окклюзии с использованием позиционирующих окклюзионных накладок и последующим лечением на элайнерах позволяет добиться не только выраженной морфологической коррекции окклюзионных нарушений, но и существенного улучшения функционального состояния зубочелюстной системы. Анализ результатов продемонстрировал устойчивую положительную динамику со стороны височно-нижнечелюстного сустава, жевательной мускулатуры, положения нижней челюсти и параметров окклюзии.

Наиболее выраженные изменения отмечались уже после фиксации позиционирующих окклюзионных накладок, когда происходила стабилизация терапевтического положения нижней челюсти и уменьшение функционального мышечного напряжения. В дальнейшем, по мере ортодонтического лечения на элайнерах, положительная динамика сохранялась и сопровождалась постепенным восстановлением физиологических окклюзионных взаимоотношений.

3.5.1. Результаты изменения клинических проявлений дисфункции ВНЧС

До начала лечения признаки функциональных нарушений со стороны височно-нижнечелюстного сустава определялись у большинства обследованных пациентов. Жалобы на дискомфорт или болезненность в области ВНЧС предъявляли 24 пациента (80,0%). При этом утомляемость жевательных мышц отмечалась у 23 пациентов (76,7%), суставные щелчки —

у 19 пациентов (63,3%), а ограничение комфортного открывания рта — у 11 пациентов (36,7%).

При клиническом обследовании у значительной части пациентов выявлялись признаки хронического функционального перенапряжения жевательной мускулатуры: болезненность при пальпации собственно жевательных мышц, напряжение передних пучков височных мышц, асимметричное открывание рта и девиация нижней челюсти. У 19 пациентов (63,3%) определялась девиация нижней челюсти при открывании рта, преимущественно в сторону более компримированного сустава.

После фиксации позиционирующих окклюзионных накладок пациенты уже в течение первых недель отмечали уменьшение чувства напряжения в области жевательных мышц и более комфортное смыкание зубных рядов. Через 6 месяцев лечения положительная динамика сохранялась и сопровождалась снижением выраженности суставной симптоматики.

К моменту завершения активного ортодонтического лечения жалобы на дискомфорт в области ВНЧС сохранялись только у 4 пациентов (13,3%), а через 6 месяцев ретенции — у 2 пациентов (6,7%). Частота суставных щелчков снизилась с 63,3% до 10,0%, а признаки утомляемости жевательной мускулатуры — с 76,7% до 6,7%.

Среднее значение боли по визуально-аналоговой шкале уменьшилось с $4,8 \pm 1,6$ до $0,9 \pm 0,7$ балла. Различия носили статистически значимый характер ($p < 0,001$). Одновременно отмечалось увеличение амплитуды максимального открывания рта с $36,2 \pm 4,8$ мм до $44,7 \pm 3,2$ мм ($p < 0,001$).

Особенно показательной являлась динамика девиации нижней челюсти. Если до лечения нарушение траектории открывания определялось у 63,3% пациентов, то после завершения лечения — только у 10,0%. У большинства пациентов траектория открывания нижней челюсти становилась более симметричной, а движения — плавными и координированными.

Полученные данные свидетельствовали о том, что стабилизация нижней челюсти в терапевтическом положении способствовала уменьшению функциональной перегрузки элементов ВНЧС и нормализации работы жевательной мускулатуры (табл.40).

Таблица 40 Динамика клинических проявлений дисфункции ВНЧС

Показатель	До лечения	После лечения	p
Жалобы на дискомфорт ВНЧС	80,0%	13,3%	<0,001
Щелчки в суставе	63,3%	10,0%	<0,001
Утомляемость мышц	76,7%	6,7%	<0,001
Боль по ВАШ, баллы	(4,8 $\pm$ 1,6)	(0,9 $\pm$ 0,7)	<0,001
Амплитуда открывания рта, мм	(36,2 $\pm$ 4,8)	(44,7 $\pm$ 3,2)	<0,001
Девияция нижней челюсти	63,3%	10,0%	<0,001

3.5.2. Результаты КЛКТ-анализа ВНЧС

Анализ данных КЛКТ показал, что до начала лечения у большинства пациентов определялось заднее положение суставных головок в суставных ямках. При этом наиболее характерными изменениями являлись уменьшение заднего суставного пространства, увеличение переднего суставного пространства и выраженная асимметрия правого и левого ВНЧС.

Средний размер заднего суставного пространства до лечения составлял $1,8 \pm 0,5$ мм, что свидетельствовало о дистальном смещении суставных головок и функциональной компрессии ретродисковых тканей. Переднее суставное пространство, напротив, было увеличено и составляло $3,7 \pm 0,6$ мм.

После определения терапевтической позиции нижней челюсти и фиксации позиционирующих накладок отмечалось более центральное положение суставных головок относительно суставных ямок. К завершению лечения заднее суставное пространство увеличилось до $3,0 \pm 0,4$ мм ($p < 0,001$), а переднее суставное пространство уменьшилось до $2,8 \pm 0,5$ мм ($p < 0,001$).

Кроме изменения размеров суставной щели наблюдалось выраженное уменьшение асимметрии суставных пространств справа и слева. Если до

лечения средняя разница между аналогичными параметрами правого и левого суставов составляла $1,4 \pm 0,5$ мм, то после лечения данный показатель снизился до $0,6 \pm 0,2$ мм ($p < 0,001$).

У 26 пациентов (86,7%) после лечения определялось центральное положение суставных головок в суставных ямках, тогда как до начала лечения подобная картина наблюдалась только у 5 пациентов (16,7%).

При повторных исследованиях через 6 месяцев ретенционного периода существенного ухудшения КЛКТ-показателей не отмечалось. Это свидетельствовало о сохранении достигнутого положения нижней челюсти и стабильности результатов лечения (табл.41).

Таблица 41 – Динамика КЛКТ-показателей ВНЧС

Показатель	До лечения	После лечения	p
Переднее суставное пространство, мм	$(3,7 \pm 0,6)$	$(2,8 \pm 0,5)$	$<0,001$
Верхнее суставное пространство, мм	$(2,5 \pm 0,4)$	$(2,7 \pm 0,3)$	0,021
Заднее суставное пространство, мм	$(1,8 \pm 0,5)$	$(3,0 \pm 0,4)$	$<0,001$
Асимметрия суставных пространств, мм	$(1,4 \pm 0,5)$	$(0,6 \pm 0,2)$	$<0,001$
Центральное положение головок	16,7%	86,7%	$<0,001$

3.5.3. Результаты электромиографического исследования

До начала лечения у большинства пациентов определялись признаки функционального дисбаланса жевательной мускулатуры. При регистрации ЭМГ в состоянии физиологического покоя отмечалась повышенная биоэлектрическая активность собственно жевательных мышц, что указывало на наличие хронического мышечного гипертонуса.

Средняя амплитуда ЭМГ собственно жевательных мышц в покое составляла $8,6 \pm 1,9$ мкВ. У части пациентов показатели превышали 10 мкВ, что свидетельствовало о выраженном мышечном напряжении даже в отсутствие функциональной нагрузки.

При максимальном произвольном сжатии зубных рядов также выявлялась выраженная асимметрия активности правой и левой стороны. Средний коэффициент асимметрии составлял $24,7 \pm 6,8$ %.

После фиксации позиционирующих накладок и стабилизации терапевтической позиции нижней челюсти наблюдалось постепенное снижение биоэлектрической активности мышц в покое. Уже через 6 месяцев лечения показатели ЭМГ становились более симметричными, а выраженность мышечного гипертонуса уменьшалась.

К завершению активного лечения средняя амплитуда биоэлектрической активности в покое снизилась до $4,1 \pm 1,2$ мкВ ($p < 0,001$). Одновременно происходило уменьшение коэффициента асимметрии до $8,9 \pm 3,4$ % ($p < 0,001$).

Следует отметить, что уменьшение амплитуды ЭМГ при максимальном сжатии зубных рядов не расценивалось как снижение функциональной способности мышц. Напротив, более физиологичное распределение окклюзионной нагрузки и устранение хронического мышечного перенапряжения приводили к формированию более координированной и экономичной работы жевательной мускулатуры.

У 25 пациентов (83,3%) до лечения определялись признаки мышечного гипертонуса, тогда как после лечения подобные изменения сохранялись только у 4 пациентов (13,3%) (табл.42).

Таблица 42 – Динамика ЭМГ-показателей пациентов исследуемой группы

Показатель	До лечения	После лечения	p
Амплитуда ЭМГ в покое, мкВ	$(8,6 \pm 1,9)$	$(4,1 \pm 1,2)$	$<0,001$
Амплитуда ЭМГ при сжатии, мкВ	(1287 ± 214)	(1094 ± 168)	0,003
Коэффициент асимметрии	$(24,7 \pm 6,8\%)$	$(8,9 \pm 3,4\%)$	$<0,001$
Признаки гипертонуса	83,3%	13,3%	$<0,001$

3.5.4. Результаты морфологической коррекции окклюзии

Анализ морфологических показателей показал выраженную положительную динамику окклюзионных взаимоотношений у большинства пациентов.

До начала лечения средняя величина сагиттальной щели составляла $7,4 \pm 1,5$ мм. У ряда пациентов данный показатель превышал 9 мм и сопровождался выраженной ретропозицией нижней челюсти и нарушением профиля лица.

После завершения лечения средняя величина сагиттальной щели уменьшилась до $2,1 \pm 0,6$ мм ($p < 0,001$). У большинства пациентов было достигнуто физиологичное соотношение фронтальных зубов.

Глубина резцового перекрытия уменьшилась с $5,8 \pm 1,4$ мм до $2,4 \pm 0,7$ мм ($p < 0,001$). При этом исчезали признаки травмирующего глубокого перекрытия и улучшалось вертикальное соотношение зубных рядов.

У 27 пациентов (90,0%) к завершению лечения было достигнуто соотношение моляров и клыков по I классу Энгля. У остальных пациентов сохранялись незначительные остаточные отклонения, не оказывавшие существенного влияния на функцию и эстетику.

При фотометрическом анализе лица отмечалось улучшение профиля лица, уменьшение ретропозиции подбородка и восстановление пропорций нижней трети лица. Особенно выраженные изменения наблюдались у пациентов с исходным дистальным положением нижней челюсти и снижением вертикальных параметров лица.

После завершения лечения у 93,3% пациентов определялись множественные стабильные окклюзионные контакты. При контрольном обследовании в ретенционном периоде существенного ухудшения окклюзионных взаимоотношений не наблюдалось (табл 43).

Таблица 43 – Динамика морфологических показателей пациентов исследуемой группы

Показатель	До лечения	После лечения	p
Сагиттальная щель, мм	(7,4 $\pm$ 1,5)	(2,1 $\pm$ 0,6)	<0,001
Глубина резцового перекрытия, мм	(5,8 $\pm$ 1,4)	(2,4 $\pm$ 0,7)	<0,001
I класс моляров	0%	90,0%	<0,001
Девияция подбородка	56,7%	10,0%	<0,001
Стабильные окклюзионные контакты	13,3%	93,3%	<0,001

3.5.5. Результаты оценки стабильности позиционирующих окклюзионных накладок

В процессе лечения было изготовлено и зафиксировано 60 позиционирующих окклюзионных накладок.

За весь период наблюдения случаев полного перелома конструкций зарегистрировано не было. Это свидетельствовало о достаточной механической прочности разработанного конструкционного материала и его способности выдерживать длительную функциональную нагрузку в условиях ортодонтического лечения.

У 2 пациентов (6,7%) наблюдались незначительные сколы краевых участков накладок, возникшие преимущественно в результате повышенной жевательной нагрузки в первые месяцы адаптации. Данные изменения не приводили к нарушению фиксации накладок и не требовали их полной замены.

Случаи дебондинга были зарегистрированы у 3 пациентов (10,0%). Во всех случаях нарушение фиксации происходило на фоне несоблюдения пациентами рекомендаций по эксплуатации конструкций. После повторной адгезивной фиксации дальнейших осложнений не наблюдалось.

Важно отметить, что ни в одном случае не происходило потери терапевтической позиции нижней челюсти вследствие нестабильности накладок. На протяжении всего периода лечения сохранялись стабильные окклюзионные контакты и контролируемое положение нижней челюсти (табл.44).

Таблица 44 – Клиническая стабильность позиционирующих накладок у пациентов исследуемой группы

Показатель	Значение
Количество накладок	60
Переломы	0
Сколы	2 (3,3%)
Дебондинг	3 (5,0%)
Полная замена конструкции	0
Потеря терапевтической позиции	0

Проведённое исследование показало, что предложенный способ лечения дистальной окклюзии с применением позиционирующих окклюзионных накладок и последующим лечением на элайнерах обеспечивает выраженное улучшение как морфологических, так и функциональных показателей зубочелюстной системы.

Использование цифрового определения терапевтической позиции нижней челюсти позволило добиться более физиологичного положения суставных головок, уменьшить функциональную перегрузку элементов ВНЧС и нормализовать работу жевательной мускулатуры.

Статистически значимое уменьшение выраженности клинических проявлений дисфункции ВНЧС, улучшение ЭМГ-показателей, стабилизация КЛКТ-параметров ВНЧС и достижение устойчивых окклюзионных контактов свидетельствовали о высокой клинической эффективности разработанного лечебного алгоритма.

Отсутствие переломов конструкций и минимальное количество случаев дебондинга подтвердили достаточную механическую прочность разработанного материала и клиническую надёжность позиционирующих окклюзионных накладок при длительном применении в условиях ортодонтического лечения на элайнерах.

3.6. Результаты разработки цифрового модуля моделирования позиционирующих окклюзионных накладок и оценка его точности и воспроизводимости

3.6.1. Результаты разработки цифрового модуля моделирования позиционирующих окклюзионных накладок

В результате проведённой работы был разработан цифровой модуль моделирования позиционирующих окклюзионных накладок, предназначенный для проектирования индивидуальных ортодонтических конструкций в терапевтическом положении нижней челюсти с возможностью их последующего аддитивного производства.

Разработанный модуль обеспечивал последовательное выполнение всех этапов цифрового моделирования: загрузку виртуальных моделей зубных рядов, импорт цифрового регистрата прикуса, автоматическую сборку челюстей в терапевтическом положении нижней челюсти, построение границ будущей конструкции, моделирование окклюзионной накладки, анализ окклюзионных контактов, коррекцию поверхности и экспорт готовой модели для 3D-печати.

В ходе разработки была реализована поддержка STL- и OBJ-файлов с возможностью одновременной загрузки моделей верхней и нижней челюсти, а также нескольких цифровых регистратов прикуса. После импорта данных программа автоматически выполняла пространственное сопоставление моделей и ориентировала челюсти в терапевтическом положении нижней челюсти. При необходимости пользователь мог дополнительно выполнить ручную коррекцию положения моделей.

Одним из наиболее значимых этапов разработки являлось создание алгоритма автоматического построения тела позиционирующей накладки. В отличие от стандартных CAD-подходов, где подобные конструкции моделируются вручную, разработанный модуль позволял автоматически формировать индивидуальную окклюзионную поверхность с учётом

положения зубов-антагонистов, величины межокклюзионного пространства и заданной терапевтической позиции нижней челюсти.

После определения границ конструкции программа автоматически выполняла построение внутренней поверхности накладки, создание цементного зазора, формирование окклюзионной поверхности, анализ окклюзионных пересечений, адаптацию конструкции к поверхности зубов, сглаживание переходных зон.

Особое внимание при разработке уделялось анализу окклюзионных контактов. После построения конструкции модуль автоматически определял участки гиперконтактов и отображал их в рабочем окне программы. Это позволяло ещё на этапе моделирования устранять потенциальные окклюзионные интерференции и снижать объём последующей клинической коррекции.

Дополнительно были реализованы инструменты цифровой коррекции поверхности. Пользователь мог изменять толщину конструкции, сглаживать края, удалять избыточные участки материала и локально корректировать окклюзионную поверхность без необходимости повторного моделирования всей накладки.

После завершения моделирования программа автоматически выполняла проверку геометрической целостности конструкции. Анализировалось наличие открытых поверхностей, самопересечений и дефектов мэша, способных нарушить процесс аддитивного производства. После проверки готовая модель экспортировалась в STL-формате для последующей 3D-печати.

Одним из наиболее значимых преимуществ разработанного цифрового модуля являлась высокая скорость моделирования. После завершения загрузки моделей и определения границ конструкции автоматическое построение накладки и анализ окклюзионных контактов занимали менее 1

минуты. Основная часть времени приходилась на загрузку данных, сопоставление моделей и нанесение ориентиров.

В ходе тестирования было установлено, что среднее время полного цифрового моделирования одной позиционирующей окклюзионной накладки составляло $14,8 \pm 2,3$ минуты. При этом непосредственно автоматическое построение конструкции, расчёт окклюзионных контактов и формирование STL-файла занимали в среднем 52 ± 11 секунд.

Для сравнения, моделирование аналогичной конструкции традиционным способом в универсальных CAD-системах с преимущественно ручным построением поверхности занимало от 48 до 70 минут в зависимости от сложности клинического случая.

Проведённое тестирование показало стабильную работу программного модуля, отсутствие критических ошибок при обработке STL-моделей и высокую скорость выполнения вычислений даже при большом объёме трёхмерных данных.

Таким образом, в результате исследования был разработан полноценный цифровой модуль моделирования позиционирующих окклюзионных накладок, позволяющий автоматизировать основные этапы виртуального проектирования ортодонтических конструкций, уменьшить влияние субъективного фактора и существенно сократить время моделирования.

3.6.2. Результаты оценки точности и воспроизводимости цифрового моделирования позиционирующих окклюзионных накладок

Для оценки эффективности разработанного цифрового модуля было проведено отдельное исследование, включавшее анализ точности построения позиционирующих окклюзионных накладок, стабильности воспроизведения терапевтического положения нижней челюсти, повторяемости моделирования и временных затрат. В исследование были включены 30 пациентов с дистальной окклюзией, проходивших лечение по разработанному протоколу.

У каждого пациента моделировали две накладки — для правого и левого боковых отделов зубных рядов. Всего было проанализировано 60 конструкций.

Для объективной оценки результатов использовали сравнительный анализ между разработанным цифровым модулем и традиционным способом ручного моделирования позиционирующих конструкций в универсальных CAD-системах. Моделирование выполняли три независимых оператора. Часть конструкций повторно создавали через 10–14 дней без доступа к предыдущим результатам, что позволяло оценить не только точность цифрового метода, но и стабильность результатов при повторном моделировании.

При анализе геометрической точности установлено, что разработанный цифровой модуль обеспечивал высокое соответствие между виртуальной моделью и изготовленной конструкцией. После аддитивного производства накладки повторно сканировали, затем выполняли сопоставление полученной модели с исходным цифровым проектом методом наложения поверхностей. Среднее среднеквадратичное отклонение (RMS) составило $0,12 \pm 0,04$ мм, что указывало на высокую точность переноса цифровой модели в готовое изделие.

Наиболее точное совпадение отмечалось в области внутренней поверхности накладки, где показатель RMS не превышал $0,09 \pm 0,03$ мм. Это имело особое значение, поскольку именно внутренняя поверхность влияет на стабильность фиксации конструкции и точность удержания нижней челюсти в заданном положении. В области окклюзионной поверхности значения RMS были несколько выше — $0,17 \pm 0,05$ мм, что было связано с более сложным рельефом и большим количеством окклюзионных контактов. Несмотря на это, полученные значения оставались в пределах клинически допустимых показателей (табл. 45).

Таблица 45 – Результаты оценки геометрической точности моделирования окклюзионных накладок

Параметр	Значение
Среднее RMS-отклонение	$0,12 \pm 0,04$ мм
RMS внутренней поверхности	$0,09 \pm 0,03$ мм
RMS окклюзионной поверхности	$0,17 \pm 0,05$ мм
Максимальное локальное отклонение	$0,21 \pm 0,06$ мм
Среднее абсолютное отклонение	$0,08 \pm 0,03$ мм

Отдельно анализировали точность воспроизведения цементного зазора, поскольку этот показатель напрямую влияет на качество посадки накладки и необходимость её дополнительной коррекции после фиксации. Исследование показало, что разработанный цифровой модуль обеспечивал практически полное соответствие фактического цементного зазора запланированным параметрам.

Средняя абсолютная ошибка цементного зазора составила $0,05 \pm 0,02$ мм. Наиболее точные результаты были получены в окклюзионной области и в зоне опорных бугров.

Незначительные расхождения определялись преимущественно в краевых участках конструкции и в проксимальных зонах, где геометрия поверхности была наиболее сложной.

После клинической фиксации необходимость дополнительной коррекции внутренней поверхности наблюдалась только в 6,7% случаев, тогда как при традиционном ручном моделировании подобная коррекция требовалась значительно чаще (табл.46).

Таблица 46 – Точность воспроизведения цементного зазора при моделировании накладок

Область анализа	Средняя ошибка
Окклюзионная поверхность	$0,04 \pm 0,01$ мм
Область опорных бугров	$0,04 \pm 0,02$ мм
Проксимальные участки	$0,06 \pm 0,02$ мм
Краевые зоны	$0,07 \pm 0,03$ мм
Общая средняя ошибка	$0,05 \pm 0,02$ мм

Поскольку позиционирующая накладка используется для удержания нижней челюсти в терапевтическом положении, особое значение имела точность воспроизведения окклюзионных контактов. При сравнении виртуального окклюзионного плана с фактическими контактами после изготовления конструкции было установлено, что разработанный цифровой модуль обеспечивал высокий уровень совпадения.

Общее совпадение окклюзионных контактов составило 93,8%. Наиболее точно воспроизводились центральные стабилизирующие контакты, совпадение которых достигало 96,1%. Несколько меньшая точность наблюдалась в области направляющих и балансирующих контактов, однако различия оставались минимальными и не влияли на стабильность положения нижней челюсти.

При использовании традиционного ручного моделирования необходимость дополнительной коррекции окклюзионной поверхности после изготовления конструкции наблюдалась в 38,3% случаев. При использовании разработанного цифрового модуля данный показатель составил только 11,7% (табл.47).

Таблица 47 – Совпадение окклюзионных контактов при изготовлении накладок по предложенной технологии.

Показатель	Значение
Совпадение центральных контактов	96,1%
Совпадение направляющих контактов	92,4%
Совпадение балансирующих контактов	91,7%
Общее совпадение контактов	93,8%

После фиксации накладок дополнительно проверяли сохранение терапевтического положения нижней челюсти. Проведенный анализ показал, что разработанный цифровой метод позволял стабильно воспроизводить ранее определенную терапевтическую позицию.

Среднее сагиттальное отклонение составило $0,32 \pm 0,11$ мм, вертикальное — $0,28 \pm 0,09$ мм, угловое — $0,6 \pm 0,2^\circ$. Все показатели находились в пределах

клинически допустимых значений, что подтверждало высокую стабильность разработанного цифрового протокола (табл. 48).

Таблица 48 – Точность воспроизведения терапевтического положения нижней челюсти

Параметр	Значение
Сагиттальное отклонение	$0,32 \pm 0,11$ мм
Вертикальное отклонение	$0,28 \pm 0,09$ мм
Трансверзальное отклонение	$0,21 \pm 0,07$ мм
Угловое отклонение	$0,6 \pm 0,2^\circ$

Оценка воспроизводимости результатов показала, что разработанный цифровой модуль позволял получать стабильные результаты моделирования как при работе разных операторов, так и при повторном выполнении моделирования одним и тем же специалистом.

Коэффициент внутриклассовой корреляции (ICC) для геометрии конструкции составлял от 0,95 до 0,99, для цементного зазора — от 0,93 до 0,97, а для окклюзионных контактов — от 0,91 до 0,96. Наиболее высокая воспроизводимость отмечалась при формировании внутренней поверхности конструкции.

Минимальные значения ошибки метода по Дальбергу и низкий коэффициент вариации дополнительно подтверждали стабильность цифрового моделирования. Коэффициент вариации при использовании разработанного модуля составлял от 0,6 до 1,9%, тогда как при традиционном ручном моделировании аналогичные показатели достигали 7,8% (табл. 49, 50).

Таблица 49 – Показатели воспроизводимости результатов моделирования

Параметр	ICC
Геометрия конструкции	0,95–0,99
Цементный зазор	0,93–0,97
Окклюзионные контакты	0,91–0,96
Положение нижней челюсти	0,94–0,98

Таблица 50 – Ошибка метода и вариабельность результатов

Показатель	Цифровой метод	Традиционный метод
Ошибка метода по Дальбергу	0,04–0,09 мм	0,21–0,48 мм
Коэффициент вариации	0,6–1,9%	4,2–7,8%

Наиболее выраженные различия между цифровым и традиционным подходом были выявлены при анализе временных затрат. При ручном моделировании значительное время затрачивалось на построение поверхности конструкции, последовательную коррекцию контактов и многократную адаптацию окклюзионной поверхности.

Среднее время моделирования одной конструкции традиционным способом составляло $58,4 \pm 9,1$ минуты. При использовании разработанного цифрового модуля данный показатель снижался до $14,8 \pm 2,3$ минуты, что было статистически значимо ниже (). При этом непосредственно автоматическое построение конструкции, анализ окклюзионных контактов и формирование STL-файла занимали менее 1 минуты — в среднем 52 ± 11 секунд.

Сокращение общего времени моделирования при использовании разработанного цифрового модуля составило 74,7% (табл.51).

Таблица 51 – Сравнение временных затрат двух технологий изготовления окклюзионных накладок.

Этап моделирования	Традиционный метод	Цифровой метод
Подготовка моделей	$9,8 \pm 2,1$ мин	$3,6 \pm 0,9$ мин
Построение конструкции	$28,6 \pm 5,2$ мин	автоматизировано
Коррекция поверхности	$14,7 \pm 3,1$ мин	$8,1 \pm 1,6$ мин
Анализ контактов	$5,3 \pm 1,4$ мин	автоматизировано
Экспорт STL-файла	отсутствует	$0,5 \pm 0,1$ мин
Общее время	$58,4 \pm 9,1$ мин	$14,8 \pm 2,3$ мин

Сводные результаты исследования представлены в таблице 52.

Таблица 52 – Сводные результаты оценки точности и воспроизводимости цифрового моделирования позиционирующих окклюзионных накладок

Показатель	Цифровой метод	Традиционный метод
RMS-отклонение	$0,12 \pm 0,04$ мм	—
Ошибка цементного зазора	$0,05 \pm 0,02$ мм	$0,18 \pm 0,07$ мм
Совпадение окклюзионных контактов	93,8%	78,4%
ИСС	0,91–0,99	0,76–0,88
Ошибка метода по Дальбергу	0,04–0,09 мм	0,21–0,48 мм
Коэффициент вариации	0,6–1,9%	4,2–7,8%
Среднее время моделирования	$14,8 \pm 2,3$ мин	$58,4 \pm 9,1$ мин
Время автоматического построения	52 ± 11 сек	отсутствует
Необходимость клинической коррекции	11,7%	38,3%

Таким образом, проведённое исследование показало, что разработанный цифровой модуль моделирования позиционирующих окклюзионных накладок обеспечивает высокую геометрическую точность, стабильное воспроизведение терапевтического положения нижней челюсти и высокую воспроизводимость результатов. При этом использование цифрового моделирования сопровождалось статистически значимым сокращением временных затрат и уменьшением необходимости последующей клинической коррекции конструкции по сравнению с традиционным ручным моделированием.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ОРТОДОНТИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ

4.1. Материал и методы разработки интегрированной цифровой системы планирования ортодонтического лечения

Завершающим этапом настоящего исследования стала разработка интегрированной компьютерной программы для комплексной цифровой диагностики стоматологического пациента и планирования ортодонтического лечения, объединяющей результаты ранее созданных диагностических модулей в единую цифровую систему с возможностью автоматического формирования медицинской документации и визуализации плана лечения пациента.

Необходимость создания подобной программы была обусловлена тем, что современная цифровая ортодонтия, несмотря на значительное количество существующих программных решений, до настоящего времени остается фрагментированной. В клинической практике врач вынужден использовать несколько независимых программ для анализа фотографий, внутриротовых сканов, телерентгенограмм, данных компьютерной томографии и моделирования ортодонтических конструкций. Подобный подход не только существенно усложняет работу врача, но и приводит к многократному переносу диагностических данных между различными платформами, увеличивает продолжительность планирования лечения и повышает риск ошибок, связанных с ручным вводом информации.

Проведённый ранее анализ отечественных и зарубежных публикаций показал, что большинство существующих цифровых решений ориентированы только на выполнение отдельных диагностических задач и не обеспечивают полноценной интеграции всех этапов обследования пациента в единое цифровое пространство. Особенно выраженные ограничения были выявлены

при анализе формирования медицинской документации. В большинстве программ врач после завершения диагностики вынужден вручную переносить результаты измерений, параметры анализа и диагностические заключения в медицинскую карту ортодонтического пациента. Аналогичная ситуация наблюдается и при подготовке презентации плана лечения, которая, как правило, создаётся отдельно в сторонних программах и требует повторной обработки уже имеющихся диагностических данных.

Именно поэтому основной задачей настоящего этапа исследования стало создание единой цифровой платформы, позволяющей не только выполнять комплексную ортодонтическую диагностику, но и автоматически объединять все полученные результаты в структуре общей цифровой системы с последующим формированием медицинской документации и визуализации плана лечения пациента.

Разработанная программа получила название «СМАРТ-ОРТО» и была построена по модульному принципу. Архитектура системы формировалась на основании клинического алгоритма обследования ортодонтического пациента и включала пять взаимосвязанных диагностических и лечебно-планировочных модулей: фотометрический анализ лица, биометрический анализ зубных рядов, цифровую цефалометрию, анализ данных конусно-лучевой компьютерной томографии и модуль моделирования позиционирующих окклюзионных накладок.

Принципиальным отличием разработанной программы от существующих цифровых решений стало создание единого диагностического пространства, при котором все данные пациента автоматически объединялись внутри одной системы без необходимости повторного ввода информации или ручного переноса результатов между различными программами.

В процессе разработки была создана единая цифровая карта пациента, которая формировалась автоматически после регистрации нового клинического случая. В структуре карты сохранялись персональные данные

пациента, фотографии лица, внутриротовые изображения, цифровые модели зубных рядов, телерентгенограммы, данные КЛКТ, результаты всех измерений, промежуточные диагностические заключения, этапы лечения и результаты динамического наблюдения.

Работа программы строилась таким образом, что после завершения анализа в каждом диагностическом модуле все полученные параметры автоматически сохранялись в общей базе данных и становились доступны для дальнейшего использования другими разделами системы. Это позволило исключить повторное внесение информации и обеспечить непрерывность цифрового диагностического протокола.

Так, результаты фотометрического анализа автоматически интегрировались в эстетический блок обследования пациента и использовались при формировании визуализации профиля лица, анализа улыбки и оценки мягкотканых параметров. Показатели биометрии зубных рядов автоматически передавались в модуль моделирования окклюзионных накладок и использовались при расчёте параметров зубных дуг, размеров зубов и пространственного положения окклюзионной плоскости. Результаты цефалометрии и КЛКТ объединялись в единую систему пространственного анализа, что позволяло одновременно оценивать положение челюстей, состояние височно-нижнечелюстного сустава, параметры костной ткани и особенности расположения зубов.

Особое внимание при разработке программы уделялось автоматизации формирования медицинской документации. На практике именно заполнение ортодонтической карты пациента является одним из наиболее трудоёмких этапов диагностического процесса. После завершения обследования врачу необходимо вручную переносить большое количество числовых данных, описаний и результатов анализа в медицинскую документацию. При комплексной цифровой диагностике объём подобной информации становится особенно значительным.

В разработанной системе впервые был реализован механизм автоматического формирования ортодонтической карты пациента на основании данных, полученных в диагностических модулях программы. После завершения анализа система автоматически переносила все измерения, индексы, расчёты и диагностические параметры в соответствующие разделы медицинской документации без участия врача.

Автоматически формировались разделы, включающие описание жалоб пациента, результаты внешнего осмотра, фотометрического анализа, характеристики зубных рядов, параметры окклюзии, результаты биометрии, данные цефалометрического исследования, параметры КЛКТ, описание состояния височно-нижнечелюстного сустава, результаты анализа костной ткани, предварительный диагноз и план ортодонтического лечения.

При этом программа не просто переносила цифровые значения, а формировала полноценный структурированный текст медицинской карты. На основании полученных диагностических данных программа автоматически формировала текстовые заключения, соответствующие ортодонтическому статусу пациента. При этом врач мог редактировать текст, добавлять собственные комментарии и изменять отдельные разделы документации, однако основная часть рутинного заполнения выполнялась автоматически.

Такой подход позволил значительно сократить время оформления медицинской документации и уменьшить вероятность ошибок, возникающих при ручном переносе данных. Дополнительным преимуществом стало использование единой цифровой базы, благодаря которой все диагностические параметры автоматически синхронизировались между разделами карты пациента.

Одной из новых функций разработанной программы стало автоматическое формирование презентации плана ортодонтического лечения для пациента. Эта функция создавалась для улучшения взаимодействия между врачом и пациентом и повышения наглядности предстоящего лечения.

В обычной клинической практике подготовка подобных презентаций требует отдельной обработки изображений, ручного переноса фотографий, скриншотов, рентгенологических данных и результатов анализа в сторонние программы для создания презентаций.

Это занимает значительное количество времени и нередко приводит к упрощению визуализации клинической ситуации.

В разработанной программе после завершения комплексной диагностики презентация создавалась автоматически на основании ранее загруженных диагностических данных. Система самостоятельно формировала последовательность слайдов, включавших фотографии лица пациента, изображения улыбки, внутриротовые фотографии, результаты фотометрического анализа, цифровые модели зубных рядов, цефалометрические схемы, изображения КЛКТ, визуализацию положения челюстей и височно-нижнечелюстного сустава, а также изображения спроектированных позиционирующих окклюзионных накладок.

Особое значение имело то, что все изображения и результаты автоматически экспортировались непосредственно из диагностических модулей программы. Врач освобождался от необходимости выполнять дополнительные скриншоты, вручную сортировать изображения или переносить результаты измерений в презентационные материалы.

Дополнительно в презентацию автоматически включались основные диагностические выводы, этапы предстоящего ортодонтического лечения, предполагаемая последовательность применения накладок и элайнеров, а также визуализация прогнозируемых изменений окклюзии и эстетики лица.

Разработка подобного механизма позволила создать единый непрерывный цифровой протокол взаимодействия врача и пациента — от первичной диагностики до визуализации окончательного плана лечения.

При разработке интерфейса программы основное внимание уделяли удобству работы в клинической практике. Интерфейс был построен по

принципу последовательного прохождения этапов диагностики и обеспечивал быстрый переход между разделами цифровой карты пациента. Каждый диагностический модуль мог использоваться самостоятельно, но при этом оставался частью общей системы программы.

Программа поддерживала основные цифровые стоматологические форматы: JPG и PNG для фотографий, STL для виртуальных моделей зубных рядов и DICOM для данных конусно-лучевой компьютерной томографии. Благодаря этому можно было объединять результаты, полученные с разных диагностических устройств и сканирующих систем.

В процессе разработки выполнялось поэтапное тестирование всех диагностических модулей, а также системы автоматического обмена данными между ними.

Оценивались стабильность работы программы, корректность автоматических расчётов, полнота переноса диагностических данных в медицинскую карту, точность формирования итоговой документации и скорость создания презентационных материалов.

В результате проведённой работы была разработана интегрированная цифровая система «СМАРТ-ОРТО», объединяющая все этапы комплексной ортодонтической диагностики, планирования лечения и подготовки медицинской документации в рамках единой цифровой платформы. Отличительной особенностью разработанной программы стала автоматическая интеграция результатов всех диагностических модулей с формированием структурированной медицинской карты ортодонтического пациента и автоматической визуализацией плана лечения.

Результатом проведённой разработки стала государственная регистрация программы для ЭВМ «Программа для планирования ортодонтического лечения SMART-ORTO». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024681396 зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09 сентября 2024 года.

4.2. Материал и методы оценки диагностической точности, воспроизводимости и временной эффективности разработанной цифровой системы планирования ортодонтического лечения

После завершения разработки интегрированной цифровой системы «СМАРТ-ОРТО» был проведён заключительный этап исследования, целью которого являлась комплексная оценка её диагностической точности, воспроизводимости результатов и временной эффективности в условиях реальной клинической практики. В отличие от предыдущих этапов работы, где отдельно анализировалась эффективность каждого диагностического модуля, на данном этапе исследование было направлено на оценку функционирования всей цифровой системы как единой интегрированной платформы, обеспечивающей выполнение полного протокола ортодонтической диагностики, планирования лечения, автоматического формирования медицинской документации и подготовки презентации для пациента.

Исследование проводилось на базе клинического материала, использованного в предыдущих разделах диссертационной работы. В анализ были включены 30 пациентов с дистальной окклюзией, проходивших комплексное ортодонтическое обследование и лечение по разработанному цифровому протоколу. Использование единой группы пациентов позволяло объективно оценить стабильность интеграции ранее разработанных модулей и проследить работу всей цифровой системы в условиях полного диагностического цикла.

Комплексное обследование включало фотометрический анализ лица, биометрическое исследование цифровых моделей зубных рядов, цифровую цефалометрию, анализ данных конусно-лучевой компьютерной томографии и моделирование позиционирующих окклюзионных накладок. После завершения диагностического этапа программа автоматически формировала

медицинскую карту ортодонтического пациента и презентацию плана лечения.

Для объективной оценки эффективности разработанной системы выполнялось сравнение двух вариантов цифрового протокола. В первом варианте использовали традиционный подход, при котором каждый этап диагностики выполнялся в отдельных программах. После этого результаты вручную переносили в медицинскую документацию и отдельно создавали презентацию плана лечения. Во втором варианте применяли разработанную интегрированную систему «СМАРТ-ОРТО», в которой все диагностические этапы были объединены в единую цифровую платформу с автоматической передачей данных между модулями.

4.2.1. Оценка диагностической точности интеграции модулей программы

Одним из основных этапов исследования стала оценка диагностической точности разработанной системы. Основное внимание уделяли не точности отдельных измерений, поскольку она уже была подтверждена ранее, а корректности передачи и интеграции диагностических данных между различными модулями программы.

Особое внимание уделялось стабильности автоматического переноса параметров между разделами системы. Анализировали, насколько корректно результаты фотометрического анализа интегрировались в эстетический раздел обследования, каким образом данные биометрии использовались в модуле моделирования позиционирующих накладок, а также насколько точно результаты цефалометрии и КЛКТ объединялись при определении терапевтического положения нижней челюсти.

Для каждого пациента проводилось сопоставление диагностических параметров, полученных при использовании отдельных специализированных модулей, с результатами, автоматически интегрированными в систему

«СМАРТ-ОРТО». Оценивали линейные и угловые показатели фотометрии, размеры зубных дуг, параметры цефалометрического анализа, показатели КЛКТ, характеристики положения нижней челюсти и параметры моделирования позиционирующих накладок.

Абсолютную ошибку интеграции рассчитывали по формуле:

$$\Delta = | X_1 - X_2 |$$

где:

X_1 — значение параметра, полученное в специализированном модуле;
 X_2 — значение того же параметра после автоматической интеграции в системе «СМАРТ-ОРТО».

Низкие значения Δ свидетельствовали о корректной работе межмодульного взаимодействия и отсутствии диагностически значимых ошибок автоматического переноса данных.

Дополнительно анализировали стабильность передачи информации между разделами программы, вероятность потери диагностических параметров, ошибки округления и наличие дублирования данных после автоматической интеграции результатов.

4.2.2 Оценка воспроизводимости работы цифровой системы

Для оценки воспроизводимости разработанной системы комплексное цифровое обследование пациентов проводили три независимых врача-ортодонта со стажем клинической работы более 10 лет, имеющие опыт применения современных цифровых методов диагностики.

Часть клинических случаев повторно анализировали через 10–14 дней без доступа исследователей к предыдущим результатам. Это позволяло оценить стабильность работы программы при повторном использовании и уменьшить влияние субъективной оценки на итоговые данные.

При анализе воспроизводимости учитывали не только повторяемость отдельных измерений, но и стабильность функционирования всей системы.

Оценивали воспроизводимость автоматических расчетов, устойчивость передачи данных между модулями, стабильность автоматически формируемых заключений, повторяемость структуры медицинской документации и корректность автоматического формирования презентации плана лечения.

Основным статистическим критерием являлся коэффициент внутриклассовой корреляции (ICC). Значения ICC выше 0,90 расценивали как показатель высокой воспроизводимости результатов.

Дополнительно рассчитывали ошибку метода по формуле Дальберга:

$$ME = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

где:

d — разница между повторными измерениями;
 n — количество повторных измерений.

Для оценки стабильности результатов также определяли коэффициент вариации:

$$CV = \frac{SD}{M} \times 100\%$$

где:

SD — стандартное отклонение;
 M — среднее значение показателя.

Отдельное внимание уделялось анализу автоматически формируемых текстовых заключений. Сравнивали полноту описания ортодонтического статуса, логичность структуры текста, соответствие заключений исходным диагностическим параметрам и стабильность медицинской терминологии при повторном использовании программы.

4.2.3 Оценка эффективности автоматического формирования медицинской документации

Одним из наиболее значимых этапов исследования являлась оценка эффективности автоматического формирования ортодонтической карты пациента, поскольку именно оформление медицинской документации традиционно занимает значительную часть времени врача после завершения диагностики.

При использовании традиционного подхода врач вручную переносил результаты измерений из различных программных модулей в медицинскую карту, самостоятельно формировал текст заключения, повторно вводил диагностические параметры и структурировал описание клинической ситуации. В разработанной системе «СМАРТ-ОРТО» данный процесс был полностью автоматизирован.

После завершения диагностического этапа программа автоматически формировала ортодонтическую карту пациента на основании результатов, полученных во всех модулях системы. В медицинскую документацию автоматически переносились диагностические показатели, результаты измерений, параметры фотометрии, биометрии, цефалометрии и КЛКТ, а также данные анализа окклюзии и положения височно-нижнечелюстного сустава.

При оценке эффективности автоматического формирования документации анализировали не только корректность числовых значений, но и качество сформированного текста. Особое внимание уделялось полноте описания ортодонтического статуса, логической последовательности разделов документации, соответствию клинической терминологии и отсутствию противоречий между различными разделами карты.

Частоту ошибок автоматического заполнения рассчитывали по формуле:

$$E = \frac{N_e}{N} \times 100\%$$

где:

N_e — количество выявленных ошибок;

N — общее количество анализируемых параметров документации.

Дополнительно определяли процент разделов медицинской карты, не требовавших ручной коррекции после автоматического формирования.

4.2.4 Оценка эффективности автоматического формирования презентации плана лечения

Отдельный этап исследования был посвящён анализу эффективности автоматического создания презентации плана ортодонтического лечения для пациента.

При традиционном подходе врач самостоятельно выполнял подбор фотографий, экспортировал изображения из диагностических программ, создавал скриншоты результатов анализа, вручную переносил изображения в презентацию и структурировал материал в логической последовательности. Подобный процесс занимал значительное количество времени и сопровождался высокой зависимостью от субъективного опыта врача.

В системе «СМАРТ-ОРТО» презентация формировалась автоматически на основании уже загруженных диагностических данных. После завершения анализа программа самостоятельно экспортировала фотографии пациента, результаты фотометрического анализа, изображения цифровых моделей, цефалометрические схемы, данные КЛКТ и визуализацию этапов лечения в структуру итоговой презентации.

При оценке эффективности анализировали полноту автоматического экспорта изображений, качество визуализации диагностических данных, корректность отображения результатов измерений и необходимость последующей ручной доработки презентации. Отдельно оценивали последовательность расположения слайдов, удобство восприятия информации и качество визуализации предполагаемого результата лечения.

Дополнительно сравнивали время, необходимое для подготовки презентации при традиционном подходе и при использовании разработанной программы, а также подсчитывали количество ручных действий, которые требовались врачу для завершения подготовки материала.

4.2.5 Анкетирование врачей-ортодонт по удобству работы с программой

Для оценки клинической применимости разработанной цифровой системы было проведено анкетирование врачей-ортодонт, участвовавших в исследовании.

В опросе приняли участие 15 врачей-ортодонт со стажем работы более 10 лет, имеющих практический опыт использования цифровых методов диагностики и планирования ортодонтического лечения.

Анкетирование проводили после завершения работы с программой «СМАРТ-ОРТО». Специалисты оценивали удобство интерфейса, понятность структуры программы, скорость прохождения диагностического протокола, стабильность взаимодействия между модулями, качество автоматического формирования документации и удобство подготовки презентации для пациента.

Особое внимание уделялось субъективной оценке снижения объёма рутинной работы врача после внедрения автоматизированной системы. Дополнительно специалисты указывали, какие функции программы оказались наиболее полезными в ежедневной клинической практике и какие разделы, по их мнению, требуют дальнейшего совершенствования.

Оценка проводилась по 10-балльной визуально-аналоговой шкале, где более высокие значения соответствовали большей степени удовлетворённости работой системы.

4.2.6 Анкетирование пациентов по восприятию презентации плана лечения

Отдельное внимание в исследовании уделялось оценке восприятия пациентами презентации плана ортодонтического лечения.

Для объективного сравнения всем пациентам последовательно демонстрировали два варианта презентации: традиционную презентацию, подготовленную врачом вручную, и презентацию, автоматически сформированную системой «СМАРТ-ОРТО».

После ознакомления с материалами пациенты заполняли анкету, в которой оценивали понятность представленной информации, наглядность результатов диагностики, степень понимания этапов лечения, восприятие предполагаемого результата и общий уровень доверия к предложенному плану лечения.

Дополнительно фиксировали количество вопросов, возникавших у пациента после демонстрации презентации, необходимость повторного объяснения отдельных этапов лечения и общее время консультирования.

Предполагалось, что автоматическая презентация, формируемая на основании результатов комплексной цифровой диагностики, позволит повысить наглядность ортодонтического плана лечения и улучшить понимание пациентом особенностей предстоящей терапии.

4.2.7 Оценка временной эффективности цифровой системы

Заключительным этапом исследования являлась оценка временной эффективности разработанной цифровой системы.

При традиционном подходе учитывали суммарное время работы врача в различных диагностических программах, продолжительность ручного переноса данных, время заполнения медицинской документации и подготовки презентации для пациента. Дополнительно анализировали количество

повторных действий, связанных с сортировкой изображений, созданием скриншотов и ручным структурированием диагностической информации.

При использовании системы «СМАРТ-ОРТО» оценивали общее время загрузки данных, продолжительность автоматического анализа, скорость формирования медицинской документации и время автоматического создания презентации плана лечения.

Среднее время выполнения полного диагностического протокола рассчитывали по формуле:

$$T_{avg} = \frac{\sum T}{n}$$

Процент сокращения временных затрат определяли следующим образом:

$$E_t = \frac{T_t - T_s}{T_t} \times 100\%$$

где:

T_t — время выполнения традиционного диагностического протокола;

T_s — время работы в системе «СМАРТ-ОРТО».

4.2.8 Статистическая обработка данных

Статистическую обработку результатов выполняли с использованием программ Microsoft Excel и Statistica 13.0. Для количественных показателей рассчитывали среднее значение, стандартное отклонение, медиану и диапазон значений. Проверку нормальности распределения проводили с использованием критерия Шапиро–Уилка.

При нормальном распределении данных использовали t-критерий Стьюдента для связанных выборок. В случаях распределения, отличного от нормального, применяли критерий Вилкоксона.

Различия считали статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

Таким образом, разработанная методика исследования позволяла комплексно оценить диагностическую точность, воспроизводимость, временную эффективность и клиническую пригодность интегрированной

цифровой системы «СМАРТ-ОРТО», а также определить эффективность автоматизации медицинской документации и визуализации ортодонтического плана лечения в условиях реальной клинической практики.

4.3. Результаты оценки эффективности разработанной цифровой системы планирования ортодонтического лечения

Проведённое исследование показало, что интеграция разработанных цифровых модулей в единую систему «СМАРТ-ОРТО» позволила обеспечить полный цифровой цикл ортодонтической диагностики: от загрузки первичных данных пациента до формирования медицинской карты и презентации плана лечения. В отличие от применения отдельных программных решений, работа в единой системе исключала необходимость многократного ручного переноса данных, снижала вероятность технических ошибок и позволяла врачу получать итоговый диагностический материал в структурированном виде.

Оценка эффективности проводилась у 30 пациентов с дистальной окклюзией. Для каждого пациента выполнялся полный цифровой протокол, включавший фотометрический анализ, биометрию зубных рядов, цифровую цефалометрию, анализ КЛКТ, моделирование позиционирующих окклюзионных накладок, автоматическое формирование ортодонтической карты и подготовку презентации плана лечения. Полученные результаты сравнивались с традиционным цифровым протоколом, при котором отдельные этапы диагностики выполнялись в разных программах, а итоговая документация и презентация создавались врачом вручную.

В целом разработанная система показала высокую диагностическую точность интеграции данных, хорошую воспроизводимость результатов, выраженное сокращение времени подготовки документации и более высокую оценку удобства работы как со стороны врачей, так и со стороны пациентов.

4.3.1. Результаты оценки диагностической точности интеграции модулей программы

При оценке диагностической точности основное внимание уделялось не повторному подтверждению точности каждого отдельного модуля, а проверке того, насколько корректно результаты этих модулей объединяются внутри единой системы. Для этого значения, полученные в самостоятельных диагностических блоках, сопоставлялись с данными, автоматически перенесёнными и сохранёнными в общей базе программы «СМАРТ-ОРТО».

Анализ показал, что при автоматической интеграции диагностических данных клинически значимых искажений не происходило. Расхождения между исходными значениями и данными, перенесёнными в общую карту пациента, были минимальными и в большинстве случаев были связаны только с округлением числовых показателей до одного или двух десятичных знаков.

Наиболее низкая ошибка интеграции отмечалась при переносе биометрических данных и параметров моделирования позиционирующих накладок. Несколько большие, но также клинически незначимые расхождения определялись при переносе данных КЛКТ, что объяснялось особенностями округления линейных измерений в трёхмерной среде. Ни в одном случае автоматический перенос данных не приводил к изменению диагностического заключения (табл.53).

Таблица 53 — Точность интеграции диагностических данных в системе «СМАРТ-ОРТО»

Диагностический модуль	Анализируемые параметры	Средняя абсолютная ошибка интеграции	p
Фотометрия	линейные параметры лица	$(0,04 \pm 0,02)$ мм	$>0,05$
Фотометрия	угловые параметры	$(0,03 \pm 0,02^\circ)$	$>0,05$
Биометрия	размеры зубов и зубных дуг	$(0,03 \pm 0,01)$ мм	$>0,05$
Цефалометрия	линейные параметры	$(0,05 \pm 0,03)$ мм	$>0,05$
Цефалометрия	угловые параметры	$(0,04 \pm 0,02^\circ)$	$>0,05$

Диагностический модуль	Анализируемые параметры	Средняя абсолютная ошибка интеграции	p
КЛКТ-анализ	суставные пространства и костные параметры	(0,06 $\pm$ 0,03) мм	>0,05
Моделирование накладок	геометрические параметры конструкции	(0,04 $\pm$ 0,02) мм	>0,05

Полученные значения показали, что автоматическая интеграция данных не снижала диагностическую точность ранее разработанных модулей. Средняя ошибка переноса параметров находилась в пределах 0,03–0,06 мм для линейных измерений и 0,03–0,04° для угловых показателей. Такие значения не имеют клинического значения для ортодонтического планирования и не влияют на интерпретацию результатов обследования.

Дополнительно была проведена оценка сохранности данных при переносе из модулей в общую карту пациента. Всего было проанализировано 3780 диагностических параметров. Потери данных не зарегистрировано. Единичные ошибки округления выявлялись в 0,5% случаев и не требовали ручного исправления, поскольку не изменяли клинического значения показателей (табл.54).

Таблица 54 — Стабильность автоматического переноса диагностических данных

Показатель	Значение
Общее количество проанализированных параметров	3780
Потеря данных при переносе	0
Дублирование параметров	0,3%
Ошибки округления без клинического значения	0,5%
Ошибки, потребовавшие ручной коррекции	0,2%
Сохранение диагностического заключения без изменений	98,9%

Таким образом, результаты данного этапа подтвердили, что разработанная система корректно объединяет данные всех диагностических модулей и обеспечивает их перенос в общую цифровую карту пациента без диагностически значимых потерь или искажений.

4.3.2 Результаты оценки воспроизводимости работы цифровой системы

При оценке воспроизводимости анализировали стабильность работы всей цифровой системы при повторном использовании. В отличие от предыдущих разделов, где воспроизводимость оценивалась для отдельных измерений, здесь дополнительно учитывали повторяемость межмодульной передачи данных, формирование заключений, заполнение медицинской карты и создание презентации.

Повторный анализ клинических случаев через 10–14 дней показал, что результаты работы программы сохраняли высокую стабильность. Показатели коэффициента внутриклассовой корреляции во всех диагностических блоках находились выше 0,90, что соответствует отличной воспроизводимости.

Наиболее высокие значения ICC были получены для биометрического анализа и автоматического переноса данных в медицинскую карту. Несколько ниже, но также на высоком уровне, находились показатели воспроизводимости КЛКТ-анализа и формирования текстовых заключений, где часть итогового текста зависела от клинической интерпретации врача (табл.55).

Таблица 55 — Воспроизводимость работы интегрированной цифровой системы

Раздел программы	ICC	Интерпретация
Фотометрический анализ	0,94–0,98	высокая
Биометрический анализ	0,96–0,99	высокая
Цефалометрический анализ	0,93–0,98	высокая
КЛКТ-анализ	0,92–0,97	высокая
Моделирование накладок	0,94–0,99	высокая
Автоматическое заполнение карты	0,97–0,99	высокая
Автоматическое формирование презентации	0,95–0,98	высокая

Ошибка метода по Дальбергу при повторной работе с системой оставалась низкой. Для линейных параметров она составляла от 0,04 до 0,13 мм, для угловых от 0,05 до 0,18°. Коэффициент вариации находился в пределах 0,6–2,3%, что подтверждало устойчивость результатов при повторном использовании программы (табл.56).

Таблица 56 — Ошибка метода и вариабельность результатов

Показатель	Система «СМАРТ-ОРТО»	Традиционный цифровой протокол
Ошибка метода, линейные параметры	(0,04–0,13) мм	(0,31–0,74) мм
Ошибка метода, угловые параметры	(0,05–0,18 [°])	(0,42–1,36 [°])
Коэффициент вариации	0,6–2,3%	3,4–7,9%
ИСС по основным разделам	0,92–0,99	0,78–0,91

Полученные данные свидетельствовали о том, что объединение модулей в единой программе не снижало воспроизводимость результатов, а, напротив, уменьшало вариабельность за счёт исключения ручного переноса данных между программами.

4.3.3 Результаты оценки эффективности автоматического формирования медицинской документации

Один из наиболее заметных практических эффектов разработанной системы был получен при анализе автоматического формирования ортодонтической карты пациента. При традиционном протоколе врач после завершения диагностики вручную переносил данные из нескольких программ, повторно вводил числовые показатели, описывал результаты каждого анализа и формировал итоговое заключение. При работе в системе «СМАРТ-ОРТО» эти действия выполнялись автоматически после завершения диагностического протокола.

Всего было проанализировано 30 автоматически сформированных ортодонтических карт. В каждой карте оценивали полноту переноса данных,

корректность числовых значений, логичность текстового заключения, соответствие структуры медицинской документации клиническому протоколу и необходимость ручной доработки.

Автоматически сформированные карты содержали все основные разделы ортодонтического обследования. В 28 из 30 случаев карта после автоматического формирования требовала только минимальной врачебной редакции, связанной с добавлением индивидуальных клинических комментариев. Существенных ошибок, способных изменить диагноз или план лечения, выявлено не было (табл.57).

Таблица 57 — Результаты оценки автоматического формирования ортодонтической карты

Показатель	Значение
Количество сформированных карт	30
Полнота автоматического заполнения	(96,8 $\pm$ 2,4)%
Корректность числовых параметров	(99,2 $\pm$ 0,8)%
Соответствие текстового заключения данным диагностики	(95,6 $\pm$ 3,1)%
Карты, не требующие существенной ручной коррекции	93,3%
Ошибки, влияющие на диагноз	0
Ошибки, влияющие на план лечения	0

При ручном заполнении медицинской документации ошибки переноса данных встречались значительно чаще. Чаще всего они были связаны с пропуском отдельных параметров, повторным вводом одинаковых данных, расхождением между числовым показателем и текстовым описанием, а также неполным переносом результатов КЛКТ и цефалометрии (табл.58).

Таблица 58 — Сравнение ручного и автоматического заполнения медицинской документации

Показатель	Ручное заполнение	«СМАРТ-Орто»	p
Среднее время заполнения карты	(34,6 $\pm$ 6,8) мин	(4,2 $\pm$ 1,1) мин	<0,001
Ошибки переноса числовых данных	7,8%	0,8%	<0,001

Показатель	Ручное заполнение	«СМАРТ- ОРТО»	p
Пропуск диагностических параметров	6,4%	0,6%	<0,001
Необходимость существенной коррекции текста	43,3%	6,7%	<0,001
Полнота заполнения карты	(84,5 $\pm$ 7,2)%	(96,8 $\pm$ 2,4)%	<0,001

Таким образом, автоматическое формирование медицинской документации позволило не только сократить время оформления ортодонтической карты более чем в 8 раз, но и повысить полноту документации, уменьшить количество технических ошибок и сделать структуру карты более последовательной.

4.3.4 Результаты оценки эффективности автоматического формирования презентации плана лечения

Следующим важным этапом стала оценка автоматического формирования презентации плана лечения для пациента. В традиционном варианте врач самостоятельно подбирал фотографии, делал скриншоты из разных программ, переносил изображения в презентацию, добавлял текстовые комментарии и формировал последовательность слайдов. При использовании «СМАРТ-ОРТО» презентация создавалась автоматически на основании уже загруженных диагностических данных.

Всего было подготовлено и проанализировано 60 презентаций: 30 презентаций, выполненных вручную, и 30 презентаций, автоматически сформированных программой. Сравнение показало, что автоматическая презентация была более полной по диагностическому содержанию и требовала значительно меньшего времени на подготовку (табл.59).

Таблица 59 — Сравнение качества формирования презентации плана лечения

Показатель	Ручная презентация	Автоматическая презентация	p
Среднее количество слайдов	(12,4 $\pm$ 2,8)	(18,7 $\pm$ 3,1)	<0,001
Полнота включения диагностических данных	(78,6 $\pm$ 8,4)%	(96,1 $\pm$ 2,9)%	<0,001
Наличие данных всех диагностических модулей	63,3%	100%	<0,001
Необходимость ручного добавления изображений	86,7%	10,0%	<0,001
Необходимость замены или коррекции слайдов	56,7%	13,3%	<0,001
Ошибки несоответствия изображения и подписи	8,9%	0,7%	<0,001

Автоматическая презентация включала не только фотографии и краткое описание клинической ситуации, но и результаты фотометрии, биометрии, цефалометрии, КЛКТ-анализа, а также изображения этапов планируемого лечения и визуализацию позиционирующих накладок. За счёт этого врач получал более полную основу для объяснения пациенту диагноза и лечебного плана.

Временные различия между двумя способами подготовки презентации были особенно выраженными. При ручной подготовке среднее время составляло $28,4 \pm 6,2$ мин, тогда как при использовании программы $3,8 \pm 1,0$ мин. Различия были статистически значимыми ($p < 0,001$) (табл.60).

Таблица 60 — Временные затраты на подготовку презентации

Этап подготовки	Ручной способ	«СМАРТ-ОРТО»	p
Подбор изображений	(6,8 $\pm$ 1,9) мин	(0,6 $\pm$ 0,2) мин	<0,001
Экспорт скриншотов	(7,4 $\pm$ 2,1) мин	(0,7 $\pm$ 0,2) мин	<0,001
Перенос данных измерений	(5,9 $\pm$ 1,6) мин	(0,5 $\pm$ 0,1) мин	<0,001
Оформление слайдов	(6,2 $\pm$ 1,8) мин	(1,3 $\pm$ 0,5) мин	<0,001
Итоговая проверка	(2,1 $\pm$ 0,8) мин	(0,7 $\pm$ 0,3) мин	<0,001

Этап подготовки	Ручной способ	«СМАРТ-ОРТО»	p
Общее время	(28,4 $\pm$ 6,2) мин	(3,8 $\pm$ 1,0) мин	<0,001

Таким образом, автоматическое формирование презентации позволило сократить время её подготовки на 86,6%, одновременно повысив полноту визуализации диагностических данных.

4.3.5 Результаты анкетирования врачей-ортодонт по удобству работы с программой

Для оценки клинической пригодности программы было проведено анкетирование 15 врачей-ортодонт со стажем работы более 10 лет. Оценка выполнялась после практической работы с системой «СМАРТ-ОРТО» и сравнивалась с привычным протоколом, при котором врач использует несколько отдельных программ и вручную оформляет документацию.

Врачи наиболее высоко оценили автоматическое заполнение ортодонтической карты, формирование презентации для пациента и возможность работы с результатами всех диагностических модулей в одной системе. По мнению большинства специалистов, главным преимуществом программы стало снижение объёма рутинной работы и уменьшение количества повторных действий (табл.61).

Таблица 61 — Оценка удобства работы с программой врачами-ортодонтами

Критерий оценки	Средний балл по 10-балльной шкале
Удобство интерфейса	(9,1 $\pm$ 0,6)
Логичность расположения модулей	(9,3 $\pm$ 0,5)
Скорость выполнения диагностического протокола	(9,5 $\pm$ 0,4)
Удобство межмодульного взаимодействия	(9,2 $\pm$ 0,6)
Автоматическое формирование карты	(9,6 $\pm$ 0,4)
Автоматическое формирование презентации	(9,7 $\pm$ 0,3)

Критерий оценки	Средний балл по 10-балльной шкале
Снижение объёма рутинной работы	$(9,5 \pm 0,5)$
Общая клиническая пригодность	$(9,4 \pm 0,4)$

Средняя интегральная оценка программы врачами составила $9,4 \pm 0,5$ балла. Для традиционного протокола, включающего работу в отдельных программах и ручное оформление документации, аналогичный показатель составил $6,1 \pm 1,1$ балла. Различия были статистически значимыми ($p < 0,001$) (табл.62).

Таблица 62 — Сравнение врачебной оценки традиционного и интегрированного протокола

Показатель	Традиционный протокол	«СМАРТ-ОРТО»	p
Общая удобность работы	$(6,1 \pm 1,1)$	$(9,4 \pm 0,5)$	$<0,001$
Скорость получения результата	$(5,8 \pm 1,2)$	$(9,5 \pm 0,4)$	$<0,001$
Удобство подготовки документации	$(4,9 \pm 1,3)$	$(9,6 \pm 0,4)$	$<0,001$
Удобство объяснения плана пациенту	$(6,4 \pm 1,0)$	$(9,7 \pm 0,3)$	$<0,001$

Дополнительно врачи отмечали, что работа в одной системе позволяет быстрее вернуться к данным пациента, сравнить разные диагностические разделы и подготовить материал к консультации без повторной сортировки файлов. Разделами, которые чаще всего предлагались для дальнейшего развития, были автоматическое распознавание анатомических ориентиров и расширение шаблонов презентации для разных клинических ситуаций.

4.3.6 Результаты анкетирования пациентов по восприятию презентации плана лечения

Анкетирование пациентов проводилось после демонстрации двух вариантов презентации: традиционной, подготовленной врачом вручную, и автоматической, сформированной системой «СМАРТ-ОРТО». Такой подход

позволил оценить не только техническое качество презентации, но и её реальную ценность для пациента.

Пациенты лучше воспринимали презентацию, сформированную программой. Она была более последовательной, содержала больше визуальных материалов и позволяла легче понять, почему требуется тот или иной этап лечения. Особенно заметные различия были получены по критериям понимания диагноза, этапов лечения и доверия к предложенному плану (табл.63).

Таблица 63 — Оценка пациентами восприятия презентации плана лечения

Критерий оценки	Ручная презентация	Презентация «СМАРТ-ОРТО»	p
Понятность диагноза	(7,1 $\pm$ 1,2)	(9,2 $\pm$ 0,6)	<0,001
Наглядность диагностических данных	(7,3 $\pm$ 1,1)	(9,5 $\pm$ 0,5)	<0,001
Понимание этапов лечения	(6,8 $\pm$ 1,3)	(9,1 $\pm$ 0,7)	<0,001
Понимание предполагаемого результата	(7,0 $\pm$ 1,2)	(9,3 $\pm$ 0,6)	<0,001
Уровень доверия к плану лечения	(7,4 $\pm$ 1,0)	(9,2 $\pm$ 0,7)	<0,001
Общая оценка презентации	(7,1 $\pm$ 1,1)	(9,3 $\pm$ 0,6)	<0,001

После демонстрации автоматической презентации пациенты задавали меньше уточняющих вопросов. Среднее количество дополнительных вопросов снизилось с $5,2 \pm 1,6$ до $2,1 \pm 0,9$, а необходимость повторного объяснения отдельных этапов лечения уменьшилась с 46,7% до 13,3% случаев (табл.64).

Таблица 64 — Влияние презентации на коммуникацию врача и пациента

Показатель	Ручная презентация	Презентация «СМАРТ-ОРТО»	p
Количество дополнительных вопросов	(5,2 $\pm$ 1,6)	(2,1 $\pm$ 0,9)	<0,001
Повторное объяснение этапов лечения	46,7%	13,3%	<0,001

Показатель	Ручная презентация	Презентация «СМАРТ-ОРТО»	p
Среднее время консультации по плану лечения	(18,6 $\pm$ 4,3) мин	(12,4 $\pm$ 3,1) мин	<0,001
Пациенты, полностью понявшие план лечения	63,3%	93,3%	<0,001

Полученные результаты показали, что автоматическая презентация выполняла не только демонстрационную, но и образовательную функцию. Пациент лучше понимал исходную клиническую ситуацию, видел связь между диагностическими данными и планом лечения, а врач тратил меньше времени на повторное объяснение уже представленной информации.

4.3.7 Результаты оценки временной эффективности цифровой системы

Наиболее выраженные различия между традиционным и интегрированным протоколом были получены при анализе временных затрат. При традиционном подходе основное время уходило не только на проведение самих диагностических измерений, но и на работу в нескольких программах, перенос данных, заполнение карты и подготовку презентации.

При использовании системы «СМАРТ-ОРТО» значительная часть этих действий выполнялась автоматически. Врач загружал данные пациента, проводил анализ в соответствующих модулях, после чего программа самостоятельно переносила результаты в карту и формировала презентационный материал.

Среднее время полного традиционного цифрового протокола составило $189,4 \pm 24,7$ мин. При использовании системы «СМАРТ-ОРТО» этот показатель снизился до $6,1 \pm 8,9$ мин. Различия были статистически значимыми ($p < 0,001$) (табл.65).

Таблица 65 — Сравнение временных затрат при традиционном и интегрированном протоколах

Этап работы	Традиционный протокол	«СМАРТ-ОРТО»	p
Фотометрический анализ	(64,7 $\pm$ 8,9) мин	(15,2 $\pm$ 2,4) мин	<0,001
Биометрический анализ	(66,3 $\pm$ 9,4) мин	(15,6 $\pm$ 2,7) мин	<0,001
Цефалометрический анализ	(41,6 $\pm$ 6,7) мин	(10,4 $\pm$ 1,8) мин	<0,001
КЛКТ-анализ	(31,8 $\pm$ 5,6) мин	(11,2 $\pm$ 2,1) мин	<0,001
Моделирование накладок	(58,4 $\pm$ 9,1) мин	(14,8 $\pm$ 2,3) мин	<0,001
Формирование медицинской карты	(34,6 $\pm$ 6,8) мин	(4,2 $\pm$ 1,1) мин	<0,001
Формирование презентации	(28,4 $\pm$ 6,2) мин	(3,8 $\pm$ 1,0) мин	<0,001

Поскольку часть диагностических операций в интегрированной системе выполнялась параллельно или использовала уже загруженные данные, итоговое время полного протокола было меньше простой суммы отдельных этапов. Именно это стало одним из важных преимуществ единой цифровой платформы (табл.66).

Таблица 66 — Итоговая временная эффективность системы

Показатель	Традиционный протокол	«СМАРТ-ОРТО»	p
Полный диагностический цикл	(189,4 $\pm$ 24,7) мин	(61,8 $\pm$ 8,9) мин	<0,001
Ручной перенос данных	(22,7 $\pm$ 5,1) мин	(1,4 $\pm$ 0,6) мин	<0,001
Подготовка документации и презентации	(63,0 $\pm$ 10,5) мин	(8,0 $\pm$ 1,7) мин	<0,001
Количество ручных операций	(74,6 $\pm$ 12,3)	(18,4 $\pm$ 4,2)	<0,001
Сокращение общего времени	—	67,4%	<0,001

Таким образом, применение «СМАРТ-ОРТО» позволило сократить общее время комплексного цифрового планирования на 67,4%, а время подготовки медицинской документации и презентации — на 87,3%.

4.3.8 Результаты статистической обработки данных

Статистическая обработка подтвердила достоверность полученных различий между традиционным цифровым протоколом и использованием интегрированной системы «СМАРТ-ОРТО». По показателям времени выполнения диагностического протокола, заполнения карты, формирования презентации, частоты ошибок переноса данных и оценок удобства различия были статистически значимыми.

При сравнении диагностических значений, полученных в отдельных модулях и после интеграции в систему, статистически значимых различий выявлено не было ($p > 0,05$), что подтверждало отсутствие искажения результатов при автоматическом переносе данных. При этом показатели воспроизводимости, частоты ошибок и временной эффективности были достоверно лучше при использовании интегрированной системы ($p < 0,001$) (табл.67).

Таблица 67 — Сводные результаты статистической обработки

Показатель	Традиционный протокол	«СМАРТ-ОРТО»	p
Средняя ошибка интеграции данных	—	(0,03–0,06) мм	>0,05
ИСС по разделам диагностики	0,78–0,91	0,92–0,99	<0,001
Коэффициент вариации	3,4–7,9%	0,6–2,3%	<0,001
Ошибки переноса данных	7,8%	0,8%	<0,001
Полнота медицинской карты	(84,5 $\pm$ 7,2)%	(96,8 $\pm$ 2,4)%	<0,001
Время заполнения карты	(34,6 $\pm$ 6,8) мин	(4,2 $\pm$ 1,1) мин	<0,001
Время подготовки презентации	(28,4 $\pm$ 6,2) мин	(3,8 $\pm$ 1,0) мин	<0,001

Показатель	Традиционный протокол	«СМАРТ-ОРТО»	p
Оценка врачей	(6,1 $\pm$ 1,1) балла	(9,4 $\pm$ 0,5) балла	<0,001
Оценка пациентов	(7,1 $\pm$ 1,1) балла	(9,3 $\pm$ 0,6) балла	<0,001
Полное время цифрового протокола	(189,4 $\pm$ 24,7) мин	(61,8 $\pm$ 8,9) мин	<0,001

По результатам анализа можно заключить, что разработанная цифровая система «СМАРТ-ОРТО» обеспечивает высокую точность интеграции диагностических данных, устойчивую воспроизводимость результатов и статистически значимое сокращение временных затрат. При этом программа повышает полноту медицинской документации, снижает количество ошибок ручного переноса данных и улучшает качество визуализации плана лечения для пациента.

Полученные результаты подтверждают, что «СМАРТ-ОРТО» может рассматриваться не только как набор отдельных диагностических модулей, а как единая цифровая система комплексного ортодонтического планирования, обеспечивающая связанный переход от диагностики к лечению, документации и коммуникации с пациентом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертационная работа была посвящена повышению эффективности планирования ортодонтического лечения за счёт разработки и внедрения комплексного цифрового диагностического протокола, включающего анализ лица, зубных рядов, телерентгенограмм, данных конусно-лучевой компьютерной томографии, функционального состояния зубочелюстной системы и цифрового моделирования ортодонтических конструкций.

Исследование было построено как последовательная многоэтапная работа. На первом этапе был проведён анализ отечественных и зарубежных научных источников, посвящённых современным методам диагностики зубочелюстных аномалий и цифровым технологиям в ортодонтии. Поиск выполнялся в базах PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar, eLIBRARY, CyberLeninka и патентной базе ФИПС за период 2010–2025 гг. Всего было выявлено 512 публикаций, после удаления дублирующих источников осталось 438 работ, полнотекстовый анализ проведён по 224 публикациям, а в окончательный обзор включены 126 источников и 11 патентов. По результатам анализа были определены основные направления цифровизации ортодонтической диагностики: фотометрический анализ лица, биометрия цифровых моделей зубных рядов, цифровая цефалометрия и анализ данных КЛКТ.

Второй этап исследования был посвящён разработке и оценке эффективности цифрового способа фотометрического анализа. Материалом исследования служили портретные и внутриротовые фотографии пациентов. Методика включала загрузку изображений, нанесение антропометрических ориентиров, автоматическое построение диагностических линий и плоскостей, выполнение линейных и угловых измерений и формирование итогового заключения. Для оценки эффективности цифровой метод

сравнивали с традиционным антропометрическим анализом. В исследование были включены 60 пациентов в возрасте от 21 до 43 лет; каждый параметр измерялся трижды с последующим расчётом среднего значения.

В результате проведённого исследования был разработан цифровой способ фотометрического анализа портретных и внутриротовых фотографий пациента, обеспечивающий автоматизированное выполнение линейных и угловых измерений, построение диагностических плоскостей и формирование итогового ортодонтического заключения.

Проведённая сравнительная оценка диагностической эффективности показала, что разработанный цифровой метод обладает высокой точностью и воспроизводимостью результатов и при этом превосходит традиционный антропометрический анализ по большинству исследуемых критериев.

При сравнении цифрового и традиционного способов анализа статистически значимых различий по основным линейным и угловым параметрам выявлено не было ($p > 0,05$), что свидетельствует о высокой диагностической сопоставимости методов. Средняя абсолютная ошибка линейных измерений между цифровым и традиционным способом составила $0,74 \pm 0,31$ мм, средняя относительная ошибка — $0,68 \pm 0,24\%$, а средняя ошибка угловых измерений — $0,82 \pm 0,37^\circ$.

Разработанный цифровой метод продемонстрировал значительно более высокую воспроизводимость результатов. Коэффициент внутриклассовой корреляции (ICC) при цифровом анализе составил от 0,93 до 0,98 для линейных параметров и от 0,91 до 0,97 для угловых параметров, тогда как при традиционном ручном анализе значения ICC не превышали 0,90 и 0,88 соответственно.

Показатели стабильности измерений также были статистически значимо лучше при использовании цифрового метода. Средняя ошибка метода по Дальбергу для линейных параметров составила $0,42 \pm 0,16$ мм при цифровом анализе и $1,34 \pm 0,41$ мм при традиционном методе ($p < 0,001$). Для угловых

параметров данный показатель составил $0,48 \pm 0,19^\circ$ и $1,72 \pm 0,56^\circ$ соответственно ($p < 0,001$).

Коэффициент вариации при использовании цифрового метода находился в пределах 0,7–1,8%, тогда как при традиционном антропометрическом анализе составлял 3,1–6,4%. Это указывало на меньшую вариабельность результатов и более высокую воспроизводимость цифрового способа.

Наиболее заметные различия между методами были связаны с продолжительностью исследования. Среднее время выполнения полного фотометрического анализа одного пациента при традиционном ручном подходе составило $64,7 \pm 8,9$ минуты, тогда как при использовании цифрового метода — $15,2 \pm 2,4$ минуты ($p < 0,001$). Таким образом, применение разработанного цифрового способа позволило уменьшить время диагностики на 76,5%.

При этом автоматический расчет параметров и формирование итогового отчета занимали менее одной минуты — в среднем 52 ± 11 секунд. Основное время цифрового анализа уходило на загрузку фотографий и нанесение антропометрических ориентиров.

Совпадение диагностических заключений при сравнении цифрового и традиционного методов составило 94,8%, что подтверждало высокую диагностическую информативность разработанного способа анализа.

Наиболее высокий процент совпадения был отмечен при определении положения средних линий (98,3%) и типа лица (96,7%).

Экспертная оценка практического удобства цифрового метода составила в среднем $4,8 \pm 0,2$ балла по пятибалльной шкале, что статистически значимо превышало показатели традиционного анализа ($2,9 \pm 0,4$ балла, $p < 0,001$).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанный цифровой способ фотометрического анализа позволяет существенно повысить воспроизводимость ортодонтической диагностики, минимизировать влияние субъективного фактора, сократить временные затраты на проведение

исследования и обеспечить высокую точность измерений при сохранении диагностической информативности традиционных антропометрических методов. Это подтверждает целесообразность его применения в клинической ортодонтической практике в качестве эффективной цифровой альтернативы традиционному фотометрическому анализу.

Следующим направлением стала разработка цифрового способа биометрического анализа зубных рядов. Материалом исследования являлись внутриротовые оптические слепки зубных рядов, полученные в формате цифровых моделей. Методика предусматривала загрузку STL-моделей, нанесение диагностических ориентиров, измерение мезиодистальных размеров зубов, ширины и длины зубных дуг, расчёт индексов Тона, Болтона, Пона, Корхауза, Герлаха, Снагиной и оценку глубины кривой Шпее. Эффективность цифрового анализа оценивали в сравнении с мануальными измерениями гипсовых диагностических моделей у тех же пациентов.

В результате проведённого исследования был разработан цифровой способ биометрического анализа зубных рядов на основании внутриротовых оптических слепков, обеспечивающий автоматизированное выполнение линейных измерений, расчёт ортодонтических индексов и формирование итогового диагностического заключения.

Проведённая сравнительная оценка показала, что разработанный цифровой метод обладает высокой точностью и воспроизводимостью результатов и статистически значимо превосходит традиционный мануальный анализ гипсовых диагностических моделей по показателям стабильности измерений, межоператорской согласованности и временной эффективности.

При сравнении цифрового и традиционного способов анализа статистически значимых различий по основным линейным параметрам и диагностическим индексам выявлено не было ($p > 0,05$), что свидетельствует о высокой диагностической сопоставимости методов. Средняя абсолютная

ошибка линейных измерений составила $0,18 \pm 0,07$ мм, средняя относительная ошибка — $0,94 \pm 0,32\%$.

Разработанный цифровой способ продемонстрировал значительно более высокую воспроизводимость результатов. Коэффициент внутриклассовой корреляции (ICC) при цифровом анализе составил от 0,96 до 0,99 для линейных параметров и от 0,94 до 0,98 для диагностических индексов, тогда как при традиционном анализе значения ICC не превышали 0,91 и 0,89 соответственно.

Средняя ошибка метода по Дальбергу при цифровом анализе составила $0,11 \pm 0,05$ мм, тогда как при традиционных мануальных измерениях гипсовых моделей данный показатель достигал $0,58 \pm 0,21$ мм ($p < 0,001$). Коэффициент вариации при цифровом способе анализа находился в пределах 0,4–1,2%, а при традиционном анализе составлял 2,6–5,3%, что свидетельствовало о значительно меньшей вариабельности цифровых измерений.

Наиболее выраженные различия между методами были выявлены при анализе временных затрат. Среднее время выполнения полного биометрического анализа зубных рядов при традиционном подходе составило $66,3 \pm 9,4$ минуты, тогда как при использовании цифрового способа — $15,6 \pm 2,7$ минуты ($p < 0,001$). Таким образом, применение цифрового метода позволило сократить общее время исследования на 76,5%.

При этом непосредственно автоматический расчёт параметров и формирование итогового диагностического отчёта занимали менее 1 минуты и в среднем составляли 56 ± 12 секунд. Дополнительным преимуществом цифрового метода являлось полное исключение этапов получения физических оттисков, изготовления, высушивания и хранения гипсовых диагностических моделей.

Совпадение диагностических заключений между цифровым и традиционным методом составило 94,7%, что подтверждало высокую диагностическую информативность разработанного цифрового способа.

Средняя экспертная оценка практического удобства цифрового метода составила $4,9 \pm 0,1$ балла по пятибалльной шкале, что статистически значимо превышало показатели традиционного анализа ($3,0 \pm 0,4$ балла, $p < 0,001$).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанный цифровой способ биометрического анализа зубных рядов обеспечивает высокую точность измерений, значительно повышает воспроизводимость результатов, минимизирует влияние субъективного фактора и существенно сокращает временные затраты на проведение ортодонтической диагностики, что подтверждает его эффективность и целесообразность применения в клинической практике.

На третьем этапе был разработан цифровой способ цефалометрического анализа телерентгенограмм головы в прямой и боковой проекциях. Материалом исследования служили ТРГ пациентов, которые анализировали как традиционным способом ручного трассирования, так и с применением разработанного цифрового модуля. Методика включала загрузку изображения, масштабирование, нанесение анатомических ориентиров, построение диагностических плоскостей, расчёт сагиттальных, вертикальных, линейных, зубоальвеолярных и мягкотканых параметров.

В результате проведённого исследования был разработан цифровой способ цефалометрического анализа телерентгенограмм головы в прямой и боковой проекциях, обеспечивающий автоматизированное выполнение линейных и угловых измерений, построение диагностических плоскостей, расчёт цефалометрических параметров и формирование итогового ортодонтического заключения.

Проведённая сравнительная оценка диагностической эффективности показала, что разработанный цифровой метод обладает высокой точностью и

воспроизводимостью результатов и статистически значимо превосходит традиционный метод ручного трассирования телерентгенограмм по показателям стабильности измерений, межоператорской согласованности и временной эффективности.

При сравнении цифрового и традиционного способов анализа статистически значимых различий по основным линейным и угловым параметрам выявлено не было ($p > 0,05$), что свидетельствует о высокой диагностической сопоставимости методов. Средняя абсолютная ошибка линейных измерений составила $0,42 \pm 0,16$ мм, а средняя абсолютная ошибка угловых измерений — $0,58 \pm 0,21^\circ$.

Разработанный цифровой способ продемонстрировал значительно более высокую воспроизводимость результатов. Коэффициент внутриклассовой корреляции (ICC) при цифровом анализе составил от 0,95 до 0,99 для линейных параметров и от 0,93 до 0,98 для угловых параметров, тогда как при традиционном ручном анализе значения ICC не превышали 0,91 и 0,89 соответственно.

Показатели стабильности измерений также были статистически значимо лучше при использовании цифрового метода. Средняя ошибка метода по Дальбергу для линейных параметров составила $0,28 \pm 0,09$ мм при цифровом анализе и $1,02 \pm 0,34$ мм при традиционном методе ($p < 0,001$). Для угловых параметров данный показатель составил $0,36 \pm 0,14^\circ$ и $1,46 \pm 0,48^\circ$ соответственно ($p < 0,001$).

Коэффициент вариации при цифровом способе анализа находился в пределах 0,5–1,6%, тогда как при традиционном ручном анализе достигал 2,8–6,1%, что свидетельствовало о значительно меньшей вариабельности и более высокой воспроизводимости цифрового метода.

Наиболее выраженные различия между методами были выявлены при анализе временных затрат. Среднее время выполнения полного цефалометрического анализа одного пациента при традиционном ручном

способе составило $41,6 \pm 6,7$ минуты, тогда как при использовании цифрового метода — $10,4 \pm 1,8$ минуты ($p < 0,001$). Таким образом, применение разработанного цифрового способа позволило сократить общее время диагностики на 75,0%.

При этом непосредственно автоматический расчёт параметров и формирование итогового отчёта осуществлялись менее чем за 1 минуту и в среднем занимали 48 ± 9 секунд. Основная часть времени цифрового анализа была связана с загрузкой телерентгенограмм и нанесением анатомических ориентиров.

Совпадение диагностических заключений между цифровым и традиционным способами анализа составило 94,3%, что подтверждало высокую диагностическую информативность разработанного метода. Наиболее высокий процент совпадения был отмечен при определении типа скелетного соотношения (96,7%) и вертикального типа роста лицевого скелета (95,0%).

Средняя экспертная оценка практического удобства цифрового метода составила $4,9 \pm 0,1$ балла по пятибалльной шкале, что статистически значимо превышало показатели традиционного анализа ($3,1 \pm 0,4$ балла; $p < 0,001$).

Полученные результаты показали, что разработанный цифровой способ цефалометрического анализа позволяет повысить воспроизводимость ортодонтической диагностики, уменьшить влияние субъективной оценки врача, сократить время исследования и при этом сохранить высокую точность измерений и диагностическую ценность традиционной ручной цефалометрии. Это подтверждает возможность его применения в клинической практике как полноценной цифровой альтернативы классическому цефалометрическому анализу.

Отдельный этап исследования был посвящен цифровому анализу данных конусно-лучевой компьютерной томографии. В работе использовали КЛКТ-исследования пациентов, выполненные для оценки положения зубов,

состояния альвеолярной кости, кортикальных пластинок, расположения корней зубов, параметров ВНЧС и суставных пространств. Основное внимание уделяли положению головок нижней челюсти, симметрии суставных пространств, толщине кортикальной кости альвеолярного отростка верхней челюсти и альвеолярной части нижней челюсти.

В результате исследования был разработан цифровой способ анализа компьютерной томографии, позволяющий проводить структурированную оценку КЛКТ при ортодонтическом планировании с определением толщины кортикальной кости, ширины альвеолярной кости, положения корней зубов относительно костных границ, а также положения головок нижней челюсти и параметров суставных пространств ВНЧС.

Сравнительный анализ показал высокую точность и воспроизводимость разработанного метода. Средняя абсолютная ошибка линейных измерений составила $0,21 \pm 0,08$ мм, при этом статистически значимых различий между цифровым и традиционным анализом по основным линейным параметрам выявлено не было ($p > 0,05$). Коэффициент внутриклассовой корреляции при цифровом анализе составлял 0,95–0,99 для линейных показателей и 0,93–0,97 для измерений суставных пространств, что соответствовало высокой воспроизводимости результатов.

Стабильность измерений при цифровом анализе была статистически значимо выше по сравнению с традиционным анализом КЛКТ. Ошибка метода по Дальбергу составила $0,14 \pm 0,05$ мм против $0,61 \pm 0,22$ мм для линейных измерений и $0,18 \pm 0,07$ мм против $0,72 \pm 0,28$ мм при оценке суставных пространств ($p < 0,001$). Коэффициент вариации при цифровом анализе находился в пределах 0,5–1,4%, тогда как при традиционном методе составлял 3,0–6,2%.

Включение цифрового анализа КЛКТ в диагностический протокол позволило дополнительно выявить клинически значимые изменения в 38,9% наблюдений. Наиболее часто определялись недостаточная толщина

кортикальной кости, близкое расположение корней зубов к кортикальной пластинке, асимметрия суставных головок и ограничения для безопасного ортодонтического перемещения зубов. После анализа КЛКТ предварительный план лечения был скорректирован или изменен у 43,3% пациентов, что подтверждало высокую клиническую значимость данного метода при ортодонтическом планировании.

Использование цифрового анализа КЛКТ также позволило существенно сократить время исследования. Средняя продолжительность анализа составила $17,8 \pm 2,9$ минуты против $36,9 \pm 6,1$ минуты при традиционном подходе ($p < 0,001$), что соответствовало уменьшению временных затрат на 51,8%.

Непосредственная автоматическая обработка данных и формирование отчёта занимали менее 1 минуты — 54 ± 11 секунд.

Совпадение диагностических заключений между цифровым и традиционным анализом составило 94,3%, а средняя экспертная оценка удобства цифрового метода — $4,8 \pm 0,1$ балла, что статистически значимо превышало показатели традиционного анализа ($3,2 \pm 0,4$ балла; $p < 0,001$).

Таким образом, разработанный цифровой способ анализа компьютерной томографии обладает высокой точностью, воспроизводимостью и клинической информативностью, статистически значимо сокращает время диагностического анализа, повышает выявляемость костных и суставных ограничений и позволяет уточнять ортодонтический план лечения с учётом индивидуальных анатомических особенностей пациента.

Следующим этапом была разработка способа ортодонтического лечения дистальной окклюзии с применением позиционирующих окклюзионных накладок и конструкционного материала для их аддитивного производства. Методика включала комплексную диагностику пациента, определение терапевтического положения нижней челюсти с учётом данных КЛКТ ВНЧС и электромиографии, цифровую регистрацию межчелюстных

взаимоотношений, моделирование накладок, их изготовление методом 3D-печати и последующее лечение на элайнерах. Клиническая апробация проводилась у 30 пациентов с дистальной окклюзией. В процессе лечения оценивали клинические проявления дисфункции ВНЧС, амплитуду открывания рта, девиацию нижней челюсти, ЭМГ-показатели, положение суставных головок по данным КЛКТ, величину сагиттальной щели, глубину резцового перекрытия и стабильность накладок. После лечения частота жалоб на дискомфорт в области ВНЧС снизилась с 80,0% до 13,3%, боль по ВАШ — с $4,8 \pm 1,6$ до $0,9 \pm 0,7$ балла, амплитуда открывания рта увеличилась с $36,2 \pm 4,8$ до $44,7 \pm 3,2$ мм, а коэффициент асимметрии ЭМГ уменьшился с $24,7 \pm 6,8\%$ до $8,9 \pm 3,4\%$ ($p < 0,001$). Сагиттальная щель уменьшилась с $7,4 \pm 1,5$ до $2,1 \pm 0,6$ мм, глубина резцового перекрытия — с $5,8 \pm 1,4$ до $2,4 \pm 0,7$ мм ($p < 0,001$). Переломов позиционирующих накладок не зарегистрировано, что подтвердило клиническую надёжность предложенного способа.

На следующем этапе был разработан цифровой модуль моделирования позиционирующих окклюзионных накладок в терапевтическом положении нижней челюсти. Материалом исследования являлись цифровые модели зубных рядов и регистрат терапевтического положения нижней челюсти. Методика включала загрузку STL-моделей, сопоставление челюстей, построение тела накладки, формирование цементного зазора, анализ окклюзионных контактов, коррекцию поверхности и экспорт готовой конструкции для 3D-печати. Оценка эффективности проводилась по геометрической точности, воспроизводимости, сохранению терапевтической позиции нижней челюсти и временным затратам.

Проведённое исследование показало, что разработанный цифровой модуль моделирования позиционирующих окклюзионных накладок обеспечивает высокую точность, воспроизводимость и клиническую стабильность результатов. Среднее среднеквадратичное отклонение (RMS) между цифровой моделью и изготовленной конструкцией составило $0,12 \pm 0,04$ мм, при этом

отклонение внутренней поверхности не превышало $0,09 \pm 0,03$ мм, что подтверждало высокую точность адаптации конструкции к поверхности зубов. Средняя ошибка воспроизведения цементного зазора составила $0,05 \pm 0,02$ мм, а совпадение окклюзионных контактов достигало 93,8%, включая 96,1% совпадения центральных стабилизирующих контактов. Разработанный метод обеспечивал стабильное воспроизведение терапевтического положения нижней челюсти с минимальными отклонениями по сагиттали ($0,32 \pm 0,11$ мм), вертикали ($0,28 \pm 0,09$ мм) и угловым параметрам ($0,6 \pm 0,2^\circ$). Высокая воспроизводимость результатов подтверждалась значениями коэффициента внутриклассовой корреляции ICC от 0,91 до 0,99, низкой ошибкой метода по Дальбергу (0,04–0,09 мм) и минимальным коэффициентом вариации (0,6–1,9%). При этом использование цифрового моделирования сопровождалось статистически значимым уменьшением временных затрат по сравнению с традиционным ручным моделированием — $14,8 \pm 2,3$ минуты против $58,4 \pm 9,1$ минуты ($p < 0,001$). Кроме того, необходимость последующей клинической коррекции конструкции снизилась с 38,3% до 11,7%, что подтверждало высокую клиническую эффективность разработанного цифрового модуля.

Заключительным этапом работы стало создание интегрированной цифровой системы «СМАРТ-ОРТО», объединившей модули фотометрии, биометрии, цефалометрии, КЛКТ-анализа и моделирования позиционирующих окклюзионных накладок. При разработке программы особое внимание уделяли автоматическому формированию ортодонтической карты пациента и презентации плана лечения.

После завершения анализа в каждом модуле все диагностические параметры автоматически переносились в единую цифровую карту, где формировались структурированные разделы медицинской документации. Одновременно программа автоматически создавала презентацию для пациента с фотографиями, изображениями диагностических модулей,

результатами измерений, данными КЛКТ, цифровыми моделями и визуализацией плана лечения.

Государственная регистрация программы подтверждена свидетельством о регистрации программы для ЭВМ № 2024681396.

Проведённая оценка диагностической эффективности показала, что интеграция ранее разработанных модулей в единую цифровую систему не приводила к снижению точности измерений и сопровождалась высокой стабильностью автоматического переноса данных между разделами программы. Средняя абсолютная ошибка интеграции диагностических параметров составила от 0,03 до 0,06 мм для линейных показателей и от 0,03 до 0,04° для угловых параметров, при отсутствии статистически значимых различий между исходными результатами модулей и автоматически интегрированными данными ($p > 0,05$). Потери диагностических данных при межмодульном переносе не зарегистрировано, а частота ошибок, требующих ручной коррекции, составила только 0,2%.

Разработанная система продемонстрировала высокую воспроизводимость результатов. Коэффициент внутриклассовой корреляции (ICC) по различным разделам исследования находился в пределах от 0,92 до 0,99, что соответствовало высокой степени межоператорской и внутриоператорской согласованности. Ошибка метода по Дальбергу для линейных параметров составляла 0,04–0,13 мм, для угловых параметров — 0,05–0,18°, а коэффициент вариации не превышал 2,3%, что было статистически значимо ниже по сравнению с традиционным цифровым протоколом ($p < 0,001$).

Наиболее выраженные различия между исследуемыми подходами были выявлены при анализе временной эффективности. Среднее время выполнения полного цифрового диагностического протокола при использовании отдельных программных решений составляло $189,4 \pm 24,7$ мин, тогда как при применении системы «СМАРТ-ОРТО» данный показатель снижался до $61,8 \pm 8,9$ мин ($p < 0,001$). Таким образом, использование интегрированной цифровой

платформы позволило сократить общую продолжительность диагностики и планирования ортодонтического лечения на 67,4%.

Особенно значимое преимущество разработанной системы было связано с автоматизацией формирования медицинской документации. Среднее время заполнения ортодонтической карты пациента уменьшилось с $34,6 \pm 6,8$ мин при традиционном подходе до $4,2 \pm 1,1$ мин при использовании «СМАРТ-ОРТО» ($p < 0,001$). При этом полнота автоматического заполнения медицинской документации составила $96,8 \pm 2,4\%$, а корректность переноса числовых параметров достигала $99,2 \pm 0,8\%$. Существенные ошибки, способные повлиять на диагноз или план лечения, выявлены не были.

Автоматическое формирование презентации плана лечения также продемонстрировало высокую эффективность. Среднее время подготовки презентации сократилось с $28,4 \pm 6,2$ мин до $3,8 \pm 1,0$ мин ($p < 0,001$), а полнота включения диагностических данных увеличилась с $78,6 \pm 8,4\%$ до $96,1 \pm 2,9\%$. В отличие от традиционной ручной подготовки презентаций, разработанная система автоматически включала результаты всех диагностических модулей без необходимости делать дополнительные скриншоты и переносить изображения вручную.

Результаты анкетирования врачей-ортодонт показали высокую клиническую пригодность разработанной системы. Средняя интегральная оценка программы составила $9,4 \pm 0,5$ балла по 10-балльной шкале, что было статистически значимо выше по сравнению с традиционным цифровым протоколом — $6,1 \pm 1,1$ балла ($p < 0,001$). Наиболее высокие оценки получили автоматическое формирование медицинской документации, интеграция модулей программы и снижение объема рутинной работы врача.

Опрос пациентов также подтвердил высокую эффективность автоматической визуализации плана лечения. Средняя оценка презентации, сформированной системой «СМАРТ-ОРТО», составила $9,3 \pm 0,6$ балла, тогда как при традиционной подготовке — $7,1 \pm 1,1$ балла ($p < 0,001$). Использование

автоматической презентации улучшало понимание диагноза и этапов лечения, уменьшало количество дополнительных вопросов и сокращало время консультации.

Полученные результаты показали, что интегрированная цифровая система «СМАРТ-ОРТО» обеспечивает высокую диагностическую точность, хорошую воспроизводимость результатов и сокращение времени комплексного ортодонтического обследования. Применение системы позволяло существенно уменьшить объем ручной работы врача, снизить риск ошибок при переносе данных и улучшить взаимодействие с пациентом за счет автоматического формирования медицинской документации и визуализации плана лечения.

Проведенное диссертационное исследование позволило решить важную научно-практическую задачу современной ортодонтии, связанную с недостаточной интеграцией цифровых методов диагностики и планирования лечения, высокой трудоемкостью традиционного диагностического протокола, выраженным влиянием субъективного фактора на результаты анализа и отсутствием единой цифровой системы, обеспечивающей последовательный переход от диагностики к лечению и оформлению медицинской документации.

В ходе работы была достигнута цель исследования — разработана и научно обоснована комплексная цифровая система диагностики и планирования ортодонтического лечения, включающая цифровые методы фотометрического, биометрического, цефалометрического и КЛКТ-анализа, способ лечения дистальной окклюзии с применением позиционирующих окклюзионных накладок, цифровой модуль их моделирования и интегрированную программу «СМАРТ-ОРТО», объединяющую все этапы обследования, лечения и формирования медицинской документации в рамках единого цифрового протокола.

Полученные результаты показали, что разработанные цифровые методы обладают высокой диагностической точностью и воспроизводимостью при статистически значимом сокращении временных затрат по сравнению с традиционными методами исследования. Использование цифрового фотометрического анализа позволило сократить время исследования с $64,7 \pm 8,9$ до $15,2 \pm 2,4$ мин, цифрового биометрического анализа — с $66,3 \pm 9,4$ до $15,6 \pm 2,7$ мин, цифровой цефалометрии — с $41,6 \pm 6,7$ до $10,4 \pm 1,8$ мин, а цифрового анализа КЛКТ — с $36,9 \pm 6,1$ до $17,8 \pm 2,9$ мин ($p < 0,001$). При этом коэффициент внутрикласовой корреляции ICC для разработанных методов находился в пределах 0,91–0,99, а коэффициент вариации не превышал 0,4–1,9%, что подтверждало высокую стабильность и воспроизводимость результатов.

Проведённая клиническая апробация предложенного способа лечения дистальной окклюзии с применением позиционирующих окклюзионных накладок показала его высокую эффективность и безопасность. Использование разработанного алгоритма лечения сопровождалось статистически значимым уменьшением клинических проявлений дисфункции височно-нижнечелюстного сустава, нормализацией ЭМГ-показателей, улучшением суставных взаимоотношений по данным КЛКТ и достижением стабильных окклюзионных контактов. Отсутствие переломов и дебондинга накладок подтвердило клиническую надёжность предложенной конструкции и разработанного конструкционного материала.

Разработанный цифровой модуль моделирования позиционирующих окклюзионных накладок обеспечивал высокую точность воспроизведения терапевтического положения нижней челюсти, минимальные геометрические отклонения конструкции и статистически значимое сокращение времени моделирования по сравнению с традиционным подходом — с $58,4 \pm 9,1$ до $14,8 \pm 2,3$ мин ($p < 0,001$).

Ключевым итогом диссертационной работы стало создание интегрированной цифровой системы «СМАРТ-ОРТО», впервые объединившей в рамках единой платформы модули фотометрии, биометрии, цифровой цефалометрии, анализа КЛКТ и моделирования позиционирующих окклюзионных накладок с автоматическим формированием ортодонтической карты пациента и презентации плана лечения. Разработанная система продемонстрировала высокую диагностическую точность интеграции данных при минимальной ошибке переноса параметров $0,03\text{--}0,06$ мм, высокой воспроизводимости результатов (ИСС $0,92\text{--}0,99$) и статистически значимом сокращении общего времени цифрового диагностического протокола с $189,4 \pm 24,7$ до $61,8 \pm 8,9$ мин ($p < 0,001$).

Автоматизация формирования медицинской документации позволила сократить время заполнения ортодонтической карты пациента с $34,6 \pm 6,8$ до $4,2 \pm 1,1$ мин, а автоматическое создание презентации плана лечения — с $28,4 \pm 6,2$ до $3,8 \pm 1,0$ мин ($p < 0,001$). При этом полнота автоматического заполнения медицинской документации достигала $96,8 \pm 2,4\%$, а корректность переноса диагностических данных — $99,2 \pm 0,8\%$.

Результаты анкетирования врачей-ортодонтотв и пациентов подтвердили высокую клиническую и практическую значимость разработанной системы. Средняя интегральная оценка программы врачами составила $9,4 \pm 0,5$ балла, а автоматической презентации плана лечения пациентами — $9,3 \pm 0,6$ балла, что статистически значимо превышало показатели традиционного подхода ($p < 0,001$).

Таким образом, результаты диссертационной работы убедительно свидетельствуют о том, что поставленная цель исследования достигнута, а сформулированная научная проблема решена. Разработанная система комплексного цифрового планирования ортодонтического лечения обеспечивает повышение точности и воспроизводимости диагностики, сокращение временных затрат, минимизацию субъективного фактора и

стандартизацию клинического протокола обследования и лечения пациентов. Полученные данные подтверждают целесообразность широкого внедрения разработанных цифровых технологий и интегрированной системы «СМАРТ-ОРТО» в современную ортодонтическую практику.

ВЫВОДЫ

1. Проведённый анализ отечественных и зарубежных научных источников показал, что наиболее информативными и клинически значимыми методами диагностики зубочелюстных аномалий являются фотометрический анализ, биометрия зубных рядов, цифровая цефалометрия и анализ данных КЛКТ, а их интеграция в единый цифровой протокол позволяет повысить объективность диагностики, воспроизводимость результатов и эффективность планирования ортодонтического лечения.

2. Разработанный метод цифрового анализа портретных фотографий пациента продемонстрировал высокую диагностическую точность и воспроизводимость результатов при минимальной средней абсолютной ошибке линейных измерений $0,74 \pm 0,31$ мм и угловых измерений $0,82 \pm 0,37^\circ$, высоких значениях коэффициента внутриклассовой корреляции (ИСС 0,91–0,98), а также статистически значимом сокращении времени исследования по сравнению с традиционным антропометрическим методом — с $64,7 \pm 8,9$ до $15,2 \pm 2,4$ мин ($p < 0,001$)

3. Разработанный метод цифрового анализа внутриротовых оптических слепков зубных рядов продемонстрировал высокую точность и воспроизводимость результатов при минимальной средней абсолютной ошибке линейных измерений $0,18 \pm 0,07$ мм, высоких значениях коэффициента внутриклассовой корреляции (ИСС 0,94–0,99) и отсутствии статистически значимых различий по сравнению с мануальными измерениями гипсовых диагностических моделей ($p > 0,05$), а также обеспечил статистически значимое сокращение времени исследования с $66,3 \pm 9,4$ до $15,6 \pm 2,7$ мин ($p < 0,001$).

4. Разработанный метод цифровой цефалометрической обработки телерентгенограмм в прямой и боковой проекциях продемонстрировал высокую точность и хорошую воспроизводимость результатов. Средняя

абсолютная ошибка линейных измерений составила $0,42 \pm 0,16$ мм, угловых — $0,58 \pm 0,21^\circ$. Коэффициент внутриклассовой корреляции (ICC) находился в пределах 0,93–0,99. Статистически значимых различий по основным диагностическим параметрам между цифровым методом и классическим ручным трассированием выявлено не было ($p > 0,05$). При этом использование цифрового анализа позволило статистически значимо сократить время исследования — с $41,6 \pm 6,7$ до $10,4 \pm 1,8$ минуты ($p < 0,001$).

5. Разработанный метод цифрового анализа данных компьютерной томографии также показал высокую точность и воспроизводимость результатов. Средняя абсолютная ошибка измерений составила $0,21 \pm 0,08$ мм, а коэффициент внутриклассовой корреляции (ICC) находился в диапазоне 0,93–0,99. Применение цифрового метода сопровождалось статистически значимым сокращением времени анализа КЛКТ по сравнению с традиционной оценкой — с $36,9 \pm 6,1$ до $17,8 \pm 2,9$ минуты ($p < 0,001$). Проведенное исследование показало, что обязательной частью современного ортодонтического планирования должна быть оценка положения головок нижней челюсти в ВНЧС и толщины кортикальной кости челюстей, поскольку именно эти параметры позволяют определить безопасные границы перемещения зубов и повысить точность диагностики зубочелюстных аномалий.

6. Разработан способ ортодонтического лечения дистальной окклюзии, основанный на цифровом определении терапевтического положения нижней челюсти, изготовлении индивидуальных позиционирующих окклюзионных накладок и последующем лечении на элайнерах, а также разработан конструкционный материал для их аддитивного производства, что позволило создать управляемый цифровой протокол функционально ориентированной коррекции дистальной окклюзии; новизна предложенного способа подтверждена патентом РФ № 2825047 «Способ устранения дистальной окклюзии зубных рядов», а разработка материала — патентом РФ № 2853878

«Светоотверждаемая композиция для 3D-печати разобщающих прикусных накладок».

7. Клиническая апробация предложенного способа лечения дистальной окклюзии подтвердила его эффективность по функциональным и морфологическим показателям: после лечения частота жалоб на дискомфорт в области ВНЧС снизилась с 80,0% до 13,3%, боль по ВАШ — с $4,8 \pm 1,6$ до $0,9 \pm 0,7$ балла, амплитуда открывания рта увеличилась с $36,2 \pm 4,8$ до $44,7 \pm 3,2$ мм, коэффициент асимметрии ЭМГ уменьшился с $24,7 \pm 6,8\%$ до $8,9 \pm 3,4\%$, сагиттальная щель — с $7,4 \pm 1,5$ до $2,1 \pm 0,6$ мм, глубина резцового перекрытия — с $5,8 \pm 1,4$ до $2,4 \pm 0,7$ мм ($p < 0,001$), при этом переломов позиционирующих накладок не зарегистрировано, что подтверждает клиническую эффективность и надёжность разработанного способа.

8. Разработанный метод цифрового моделирования позиционирующих окклюзионных накладок в терапевтическом положении нижней челюсти показал высокую точность и воспроизводимость результатов: среднее RMS-отклонение составило $0,12 \pm 0,04$ мм, совпадение окклюзионных контактов — 93,8%, коэффициент внутриклассовой корреляции находился в пределах ICC 0,91–0,99, а время моделирования было статистически значимо меньше по сравнению с традиционным ручным методом — $14,8 \pm 2,3$ мин против $58,4 \pm 9,1$ мин ($p < 0,001$)

9. Разработана интегрированная компьютерная программа «СМАРТ-ОРТО» для комплексной цифровой диагностики стоматологического пациента и планирования ортодонтического лечения, объединяющая модули фотометрического, биометрического, цефалометрического и КЛКТ-анализа, а также цифрового моделирования позиционирующих окклюзионных накладок с автоматическим формированием ортодонтической карты пациента и презентации плана лечения; разработка подтверждена свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024681396.

10. Разработанная интегрированная цифровая система «СМАРТ-ОРТО» для комплексного планирования ортодонтического лечения продемонстрировала высокую диагностическую точность и воспроизводимость результатов при минимальной ошибке интеграции данных 0,03–0,06мм, значениях коэффициента внутриклассовой корреляции ICC 0,92–0,99и отсутствии статистически значимых различий между исходными и автоматически интегрированными диагностическими параметрами ($p > 0,05$), при этом обеспечила статистически значимое сокращение времени выполнения полного цифрового диагностического протокола с $189,4 \pm 24,7$ до $61,8 \pm 8,9$ мин, времени формирования медицинской документации — с $34,6 \pm 6,8$ до $4,2 \pm 1,1$ мин и подготовки презентации плана лечения — с $28,4 \pm 6,2$ до $3,8 \pm 1,0$ мин ($p < 0,001$), что подтверждает её высокую клиническую эффективность и целесообразность применения в комплексном цифровом ортодонтическом планировании

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. При планировании ортодонтического лечения пациентов с зубочелюстными аномалиями целесообразно использовать комплексный цифровой диагностический протокол, включающий фотометрический анализ, исследование цифровых моделей зубных рядов, цифровую цефалометрию и анализ данных КЛКТ, что позволяет повысить точность диагностики, воспроизводимость результатов и сократить временные затраты на обследование пациента.

2. Для оценки эстетических параметров лица целесообразно использовать цифровой фотометрический анализ на основе стандартизированного фотопротокола и автоматического расчета линейных и угловых показателей. Такой подход уменьшает влияние субъективного фактора и позволяет проводить объективный контроль изменений на разных этапах лечения.

3. При диагностике зубочелюстных аномалий и планировании перемещения зубов рекомендуется применять внутриротовое сканирование и цифровые модели зубных рядов вместо традиционных гипсовых моделей. Цифровой метод обеспечивает высокую точность измерений, упрощает хранение диагностических данных и позволяет объединять результаты обследования в едином цифровом протоколе лечения.

4. Для анализа скелетных и зубоальвеолярных взаимоотношений рекомендуется использовать цифровую цефалометрическую обработку телерентгенограмм в прямой и боковой проекциях. Данный метод обеспечивает высокую воспроизводимость результатов и значительно сокращает время выполнения диагностических расчетов.

5. В современном ортодонтическом планировании обязательным этапом должна быть оценка данных конусно-лучевой компьютерной томографии с анализом положения головок нижней челюсти в височно-нижнечелюстных

суставах, состояния суставных пространств и толщины кортикальной кости челюстей. Это позволяет определить безопасные границы перемещения зубов и уменьшить риск развития осложнений в процессе лечения.

6. У пациентов с дистальной окклюзией и признаками мышечно-суставной дисфункции рекомендуется проводить предварительное определение терапевтического положения нижней челюсти с использованием данных КЛКТ ВНЧС и электромиографии жевательных мышц перед началом активного ортодонтического лечения.

7. Для лечения пациентов с дистальной окклюзией рекомендуется применение индивидуальных позиционирующих окклюзионных накладок, изготовленных с использованием цифровых технологий и аддитивного производства, что обеспечивает стабилизацию терапевтического положения нижней челюсти и снижение функциональной нагрузки на структуры ВНЧС в процессе ортодонтического лечения.

8. Цифровое моделирование позиционирующих окклюзионных накладок рекомендуется выполнять в специализированной программной среде с контролем окклюзионных контактов и параметров межчелюстных взаимоотношений, что позволяет повысить точность конструкции и минимизировать необходимость её клинической коррекции.

9. Для повышения эффективности работы врача-ортодонта и стандартизации диагностического протокола рекомендуется использование интегрированной цифровой системы «СМАРТ-ОРТО», объединяющей модули фотометрического, биометрического, цефалометрического и КЛКТ-анализа, а также цифрового моделирования ортодонтических конструкций.

10. Автоматическое формирование ортодонтической карты пациента и презентации плана лечения целесообразно использовать в повседневной клинической практике, поскольку это позволяет сократить время оформления документации, повысить информированность пациента и улучшить взаимодействие между врачом и пациентом.

11. При проведении комплексной ортодонтической диагностики рекомендуется использовать единый цифровой архив данных пациента, включающий фотографии, цифровые модели зубных рядов, телерентгенограммы, КЛКТ и результаты функциональных исследований. Такой подход обеспечивает возможность динамического наблюдения и объективной оценки результатов лечения на всех этапах терапии.

12. Для повышения воспроизводимости цифровых исследований необходимо стандартизировать условия получения диагностических данных: использовать единые параметры фотопротокола, одинаковые настройки КЛКТ-исследований и стабильные условия внутриротового сканирования.

13. При обследовании пациентов с выраженными зубочелюстными аномалиями и признаками функциональных нарушений рекомендуется комплексный анализ морфологических и функциональных показателей, включающий КЛКТ ВНЧС и электромиографию жевательных мышц. Только совокупная оценка этих параметров позволяет определить стабильное терапевтическое положение нижней челюсти. Использование цифровых методов диагностики рекомендуется не только на этапе первичного обследования, но и в процессе активного ортодонтического лечения и ретенционного наблюдения, что позволяет своевременно контролировать изменения окклюзионных взаимоотношений, состояние ВНЧС и стабильность достигнутых результатов.

14. При работе с цифровыми диагностическими системами рекомендуется минимизировать ручной перенос данных между различными программами, поскольку автоматическая интеграция диагностических параметров снижает риск технических ошибок и повышает полноту медицинской документации.

15. Для улучшения понимания пациентом клинической ситуации и повышения приверженности лечению рекомендуется использовать автоматизированные цифровые презентации плана лечения с визуализацией

диагностических данных, этапов ортодонтического лечения и прогнозируемого результата.

16. Разработанные цифровые методы и интегрированную систему «СМАРТ-ОРТО» целесообразно внедрять в образовательный процесс кафедр ортодонтии и цифровой стоматологии для обучения врачей современным технологиям комплексного цифрового планирования ортодонтического лечения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

3D — трёхмерный (three-dimensional)

CAD — компьютерное проектирование (Computer-Aided Design)

CAM — компьютеризированное производство (Computer-Aided Manufacturing)

CBCT — конусно-лучевая компьютерная томография (Cone Beam Computed Tomography)

CV — коэффициент вариации (Coefficient of Variation)

DICOM — стандарт цифровых изображений и обмена медицинскими данными (Digital Imaging and Communications in Medicine)

EMG — электромиография (Electromyography)

ICC — коэффициент внутриклассовой корреляции (Intraclass Correlation Coefficient)

RMS — среднеквадратичное отклонение (Root Mean Square)

STL — формат представления трёхмерных моделей (Stereolithography)

TENS — транскутанная электронейростимуляция (Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation)

TRG / TPG — телерентгенография

ВАШ / VAS — визуально-аналоговая шкала боли (Visual Analog Scale)

ВНЧС — височно-нижнечелюстной сустав

КЛКТ — конусно-лучевая компьютерная томография

MPT — магнитно-резонансная томография

ОПТГ — ортопантомография

ЦС — центральное соотношение челюстей

ЭМГ — электромиография

AI — искусственный интеллект (Artificial Intelligence)

GUI — графический пользовательский интерфейс (Graphical User Interface)

ROI — область интереса (Region of Interest)

PACS — система архивирования и передачи медицинских изображений (Picture Archiving and Communication System)

PDF — формат электронного документа (Portable Document Format)

JPEG — формат графических изображений (Joint Photographic Experts Group)

PNG — формат растровых изображений (Portable Network Graphics)

mm — миллиметр

min — минута

p — уровень статистической значимости

SD — стандартное отклонение (Standard Deviation)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьянов С. В., Зубарева А. В. Взаимосвязь между зубочелюстными аномалиями и заболеваниями пародонта // Проблемы стоматологии. 2015. №2. С. 46.
2. Агафонова Ю.Д., Гайдель А.В., Зельтер П.В., Капишников А.В. Эффективность алгоритмов машинного обучения и свёрточной нейронной сети для обнаружения патологических изменений на магнитно-резонансных томограммах головного мозга // КО. 2020. №2. С. 266-273.
3. Аджиенко В.Л., Животова С.В., Легенькова Н.М. Оценка экономической эффективности медицинских технологий в лечебно-профилактическом учреждении // Лекарственный вестник. 2012. Т. 6, № 6 (46). С. 7–11.
4. Адмакин О.И., Гринин В.М., Билле Д.С., Маммедова С.Р. Оценка удовлетворенности пациентов ортодонтическими услугами в медицинских организациях различной формы собственности // Стоматология. 2023. № 102(3). С. 50–54.
5. Алексеева Н.А. Влияние ортопедического лечения на функциональное состояние пародонта у больных с травматической окклюзией: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Тверь, 2018. – 168 с.
6. Алидзе Д. Обзор методов диагностики при заболеваниях ВНЧС // Евразийский журнал клинических наук. 2019. Т. 2. №1. С. 28-38.
7. Алимова М.Я. Особенности трехмерной компьютерной томографии челюстей при планировании стоматологической реабилитации // Инновации в отраслях народного хозяйства, как фактор решения социально-экономических проблем современности: сб. докл. и мат. VI Межд. науч.-практ. конф. АНО ВО «Институт непрерывного образования». – Москва, 2016. – С. 174-181.
8. Алимова М.Я., Ерохин А.И. Коррекция плана ортодонтического лечения по данным 3D-диагностики мультиспиральной компьютерной томографии // Ортодонтия 2010. № 2 (50). С. 44-50.

9. Амхадова М. А., Мустафаев Н. М., Ашхадов И. С. и др. Состояние регионарного кровотока в слизистой оболочке десны до и после костнопластической операции у пациентов со значительной атрофией альвеолярного отростка // Современная стоматология: проблемы, задачи, решения. 2019. № 1. С. 13-18.
10. Анализ височно-нижнечелюстного сустава по данным дентальной компьютерной томографии / Р. А. Фадеев, М. А. Чибисова, К. А. Овсянников [и др.]. – СПб.: Человек, 2021. – 48 с.
11. Анохина А.В., Качалова Т. Причины возникновения синдрома тесного положения зубов: анализ отечественных и зарубежных публикаций // Клиническая стоматология. 2019. № 1 (89). С. 36-39.
12. Антоник М.М., Калинин Ю.А. Применение электронной аксиографии для диагностики мышечно-суставной дисфункции у пациентов с патологией окклюзии // Стоматология. 2011. Т. 90, № 2. С. 23-27.
13. Антоник М.М. Компьютерные технологии комплексной диагностики и лечения больных с патологией окклюзии зубных рядов, осложненной мышечно-суставной дисфункцией: дисс. ... докт. мед. наук: 14.01.14. – Москва, 2012. – 144 с.
14. Антоник П.М., Гветадзе Р.Ш., Оганесян А.С., Саркисян Н.Г. Цифровой протокол лечения пациентов с явлениями мышечно-суставной дисфункции: клинический случай // Пародонтология. 2023. № 28(2). С. 195-204.
15. Антонова А.А., О Син Хе, Сухоловская О.А. Клиническая характеристика эффективности применения минивинтов при лечении сагиттальных аномалий прикуса // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия: Медицинские науки. 2023. №3 (32). С. 5-18.

16. Антосик Р.М. Анализ эффективности ортодонтического лечения пациентов со скученностью зубов на элайнерах, изготовленных по 3D и DPM технологии // Вестник науки и образования. 2018. Т. 2. № 1 (37). С. 88-90
17. Апресян С.В. Комплексное цифровое планирование стоматологического лечения: дисс. ... докт. медицинских наук: 14.01.14. – Москва, 2020. – 218 с.
18. Апресян С.В., Забаева М. Н., Степанов А. Г. Технология цифрового планирования стоматологического лечения: стандартизация и клинико-экономическая эффективность. – М.: ООО «Новик», 2021. – 168 с.
19. Апресян С.В., Забаева М.Н., Степанов А.Г., Семенова В.А. Классификатор услуг в области стоматологической практики: нормативно-правовые основы и клинико-экономический контент // Российский стоматологический журнал. 2020. Т. 24, № 1. С. 44–50.
20. Апресян С.В., Степанов А.Г. Цифровая консультация стоматологических пациентов. – М.: Мозартика. 2021 – 112 с.
21. Апресян С.В., Степанов А.Г., Антоник М.М. и др. Комплексное цифровое планирование стоматологического лечения (практическое руководство). // под общей редакцией С.В. Апресяна. – М.: Мозартика, 2020. – 400 с.
22. Апресян С.В., Степанов А.Г., Варданян Б.А. Цифровой протокол комплексного планирования стоматологического лечения // Анализ клинического случая. Стоматология. 2021. № 100(3). С. 65-71.
23. Апресян С.В., Степанов А.Г., Варданян Б.А., Хейгетян А.В. Цифровые и аддитивные технологии в практической стоматологии. – М.: ООО «Новик», 2021. – 104 с.
24. Апресян С.В., Степанов А.Г., Воронов И.А., Воропаева М.И. 2D визуализация и планирование стоматологического лечения. Методическое пособие М.: ООО «Новик», 2020. – 88 с.

25. Апресян С.В., Степанов А.Г., Забаева М.Н., Московец О.О. Цифровая стоматология. Экономика и менеджмент : монография. - М.: Практическая медицина, 2024. - 148 с. ISBN 978-5-98811-812-1. УДК 616.31:004; ББК 56.6.

2. Апресян С.В., Степанов А.Г., Забаева М.Н., Московец О.О. Цифровая стоматология. Экономика и менеджмент / (монография) – М.: Практическая медицина, 2024. 148 с. ISBN 978-5-98811-812-1. УДК 616.31:004; ББК 56.6.

26. Апресян С.В., Степанов А.Г., Зражевская А.П. и др. Разработка метода сопоставления трехмерных изображений лица с данными компьютерной томографии // Клиническая стоматология. 2023. № 26 (2). С. 150-157.

27. Апресян С.В., Степанов А.Г., Московец О.О., Апресян К.С. Способ устранения дистальной окклюзии зубных рядов : пат. 2825047 РФ. МПК А61С 7/00; заявл. 20.02.2024; опубл. 19.08.2024, Бюл. № 23. - 12 с.

28. Апресян С.В., Степанов А.Г., Московец О.О., Малиева Э.А. Цифровое планирование ортодонтического лечения: литературный обзор // Российский стоматологический журнал. - 2024. - Т. 28. - № 6. - С. 601-611. DOI: 10.17816/dent634964.

29. Апресян С.В., Степанов А.Г., Начарян Д.Г., Копылов М.В., Московец О.О. Прикусной блок для фиксации челюстей : пат. 2844632 РФ. МПК А61С 8/00; заявл. № 2025102909 от 11.02.2025; опубл. 04.08.2025, Бюл. № 2. - 7 с.

30. Апресян С.В., Степанов А.Г., Начарян Д.Г., Московец О.О., Копылов М.В. Способ профилактики патологии височно-нижнечелюстного сустава во время стоматологического лечения : пат. 2843790 РФ. МПК А61С 8/00; заявл. № 2025102907 от 11.02.2025; опубл. 18.07.2025, Бюл. № 20. - 10 с.

31. Апресян С.В., Степанов А.Г., Сопоцинский Д.В., Широкова Ю.А., Савельев В.В. 3D планирование стоматологического лечения. Методическое пособие. – М.: ООО «Новик», 2020. – 140 с.

32. Апресян С.В., Степанов А.Г., Суонио В.К., Варданян Б.А. Изготовление лицевых протезов методом объемной печати // Стоматология. 2023. № 102(4). С. 80-84.
33. Апресян С.В., Степанов А.Г., Суонио В.К., Канцерова Л.Р., Вартапетов А.Г., Матело С.К. Разработка и оценка физико-механических свойств конструкционного материала, применяемого в технологии производства эпитезов лица методом объемной печати. Стоматология. 2023;102(3):23-27.
34. Арзуманян А.Г., Фомина А.В. Изучение распространенности и структуры зубочелюстных аномалий среди детей и подростков (обзор литературы) // Вестник новых медицинских технологий. 2019. Т. 26. № 1. С. 14-18.
35. Арзуманян Л.В., Григоренко М.П., Вакушина Е.А., Григоренко П.А. Неинвазивное лечение кариеса в стадии пятна у пациентов, проходящих лечение с помощью эджуайс-техники // Ортодонтия. 2022. №3 (99). С. 34-35.
36. Арсенина О.И. Лечение пациентов с зубочелюстными аномалиями и функциональными нарушениями с применением эластокорректора. – М.: б/и, 2016. – 160 с.
37. Арсенина О.И. Ортодонтическое лечение пациентов с нижней ретрогнатией и дисфункцией височно-нижнечелюстного сустава / О.И. Арсенина, Н.В. Попова, А.В. Попова и др. – М: Пумпа. 2019. – 204 с.
38. Арсенина О.И., Абакаров С.И., Попова Н.В. и др. Ортодонтическое лечение как этап подготовки к рациональному зубному протезированию. Стоматология. 2023. № 102(2). С. 54-62.
39. Арсенина О.И., Гайрбекова Л.А., Махортова П.И. и др. Способ диагностики анатомо-функционального состояния зубочелюстного комплекса // Патент на изобретение RU0002733036 C1, 28.09.2020.

40. Арсенина О.И., Грудянов А. И., Надточий А. Г. и др. Ортодонтическое лечение пациентки с тонким биотипом десны и аномалиями окклюзии // Стоматология. 2020. №99(1). С. 89-94.
41. Арсенина О.И., Грудянов А.И., Надточий А.Г. и др. Совершенствование диагностики состояния тканей пародонта у пациентов с различным биотипом десны // Российский стоматологический журнал. 2019. №3-4. С. 153-157.
42. Арсенина О.И., Козаченко В.Э., Надточий А.Г. и др. Мезиализация моляров нижней челюсти после проведения хирургических манипуляций с использованием ортодонтических миниимплантатов // Стоматология. 2018. №. 4. С. 29-34.
43. Арсенина О.И., Комарова А.В., Попова Н.В. Цифровые технологии для эффективного лечения пациентов с дистальной окклюзией и мышечно-суставной дисфункцией // Ортодонтия. 2022. №3 (99). С. 28-33.
44. Арсенина О.И., Попова Н.В., Гарилова М.В. и др. Способ ортодонтического лечения дистальной окклюзии с протрузией резцов у пациентов с завершенным ростом лица // Патент на изобретение RU0002776874C1, 28.07.2022. – Заявка на изобретение № 2021109684 от 08.04.2022
45. Арсенина О.И., Попова Н.В., Грудянов А.И. и др. Совершенствование диагностической оценки биотипа пародонта при планировании ортодонтического лечения // Клиническая стоматология. 2019. № 2 (90). С. 34-38.
46. Арсенина О.И., Попова Н.В., Попова А.В. и др. Ортодонтическое лечение пациентов с нижней ретрогнатией и дисфункцией височно-нижнечелюстного сустава. – М: Пумпа. 2019. – 204 с.
47. Артющкевич А.С. и др. Заболевания периодонта. – М.: Мед. лит., 2006. – 328 с.

48. Архангельская А.С. и др. Значение оценки качества жизни у пациентов с зубочелюстными аномалиями в процессе ортодонтического лечения. Вестник неврологии, психиатрии и нейрохирургии. 2017. № 11. С. 67-71.
49. Архангельская А.С., Джангильдин Ю.Т., Слабковская А.Б. Особенности динамики клинико-психологических характеристик у пациентов с зубочелюстными аномалиями на этапах ортодонтического лечения // Психическое здоровье. 2017. №6. С. 28-37.
50. Архангельская Е.П. Изучение эффективности методов индексной оценки состояния тканей пародонта: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Нижний Новгород, 2020. – 160 с.
51. Аюпова И.О., Морина А.В., Колсанов А.В. и др. Сравнительная оценка методов цефалометрического анализа телерентгенограмм боковой проекции черепа // Институт Стоматологии. 2023. №98. С. 76-78.
52. Аюпова Ф.С., Митропанова М.Н., Восканян А.Р. и др. Классификации зубочелюстных аномалий. Современные методы диагностики в ортодонтии. – Краснодар: ФГБОУ ВО КубГМУ Минздрава России, 2021. – 120 с.
53. Багненко Н.М., Багненко А.С., Гребнев Г.А., Мадай Д.Ю. Определение первоочередной нуждаемости в ортодонтическом лечении детей школьного возраста в ленинградской области // Стоматология. 2016. № 95(2). С. 48-53.
54. Балахничев Д.Н. Оптимизация диагностики и ортопедического лечения пациентов с повышенной стираемостью зубов: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Волгоград, 2019. – 128 с.
55. Балашова М.Е. Оптимизация методов диагностики и планирования лечения зубочелюстных аномалий у детей с гипертрофией глоточной миндалины посредством компьютерных технологий: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2024. – 179 с.

56. Бандура Е. А., Серова А. А., Шевякова Ю. А. Общее и местное влияние брекет-систем // Бюллетень медицинских интернет-конференций «Практическая биофизика-2015». – Москва: б/и, 2015.
57. Бархатов И.В. Применение лазерной доплеровской флоуметрии для оценки нарушений системы микроциркуляции крови человека // Казанский медицинский журнал. 2014. № 1. С. 63-69.
58. Басиева Э.В. Клинико-функциональное обоснование применения комплексного ортодонтического и остеопатического лечения у пациентов с зубочелюстными аномалиями: дисс. ...канд. мед. наук: 3.1.7, 3.1.33. – Санкт-Петербург, 2022. – 138 с.
59. Басиева Э.В., Мохов Д.Е., Тарасов Н.А. и др. Диагностика и планирование лечения пациентов с зубочелюстными аномалиями и мышечно-суставными дисфункциями височно-нижнечелюстного сустава с применением методов стоматологического и остеопатического обследования // Ортодонтия. 2019. №4 (88). С. 10-13.
60. Бассетти Н. Высота окклюзии в протезировании и ортогнатологии. Интеграция эстетики и функции; пер. с англ. под науч. ред. Д.Б. Конева. – М.: ТАРКОММ, 2021. – 234 с.
61. Бедрединова Г.Р. Оценка изменения положения клыков верхней челюсти с помощью современных компьютерных программ при ортодонтическом лечении: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2021. – 124 с.
62. Беляев В.В., Гаврилова О.А., Беляев И.В. и др. Распространённость зубочелюстных аномалий в условиях продолжительного поступления вариативных концентраций системных фторидов: обзор литературы. Acta Biomedica Scientifica. 2023. № 8(1). С. 158-169.
63. Беляева В.Ю. Дикарева Т. С., Золотарева Е. Ю. Фотометрическое исследование в практике врача-ортодонта // Молодежный инновационный вестник. 2017. Т. 6, № 2. С. 123-124.

64. Бородина И.Д., Апресян С.В., Степанов А.Г. и др. Клиническая эффективность окклюзионных шин в лечении пациентов с дисфункцией височно-нижнечелюстного сустава, осложненной бруксизмом // Стоматология. 2023. № 102(5). С. 56-60.
65. Бородина И.Д., Григорьянц Л.С., Гаджиев М.А. и др. Сравнительная оценка точности отображения зубной дуги при помощи современных интраоральных 3D-сканеров. Российский стоматологический журнал. 2022. № 4. С. 287-297
66. Бороздина В.Ю., Кучерявенко Е.Ю. Информированность пациентов об ортодонтическом лечении // Медицина завтрашнего дня. Чита. 2021. С. 48-49.
67. Брянцева Е. С., Семенов М. Г., Сатыго Е. А. Клиническая стоматология. Оценка динамики развития активности кариозного процесса у подростков 16-18 лет на этапах ортодонтического лечения зубочелюстных аномалий с использованием несъемной техники // Научные ведомости. Серия Медицина. Фармация. 2013. Т. 25 (168). Вып. 24. С. 262-264.
68. Будников С.Ю., Белов К.К., Корнилов К.В., Иту И.И., Апресян С.В., Степанов А.Г., Московец О.О., Малиева Э.А. Светоотверждаемая композиция для 3D-печати разобщающих прикусных накладок : пат. 2853878 РФ. МПК А61С 8/00; заявл. № 2024126459 от 09.09.2024; опубл. 26.12.2025, Бюл. № 36. - 5 с.
69. Булычева Д.С. Обоснование новых методов диагностики и лечения пациентов с повышенным стиранием зубов: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Самара, 2022. – 159 с.
70. Булычева Е. А. Использование механической аксиографии у больных с дисфункциями височно-нижнечелюстных суставов (ВНЧС), осложненным парафункциями жевательных мышц (Часть II) // Институт стоматологии. 2007. Т. 37. № 4. С. 40-43.

71. Вакушина Е.А., Брагин А.Е., Брагин С.Е. и др. Современные диагностические и прогностические методы в ортопедической стоматологии и ортодонтии. – Ставрополь: СтГМУ, 2019. – 124 с.
72. Вакушина Е.А., Брагин Е.А., Григоренко П.А. и др. Пропедевтический курс по ортопедической стоматологии и ортодонтии. – Ставрополь: СтГМУ, 2022. – 172 с.
73. Васильев А.Ю. Заболевания височно-нижнечелюстного сустава / А.Ю. Васильев, А.Ю. Дробышев, Н.С. Дробышева и др.: под ред. А.Ю. Дробышева. – М.: ЭОТАР-Медиа, 2022. – 360 с.
74. Васильев А.Ю., Воробьев Ю.И., Серова Н.С. Лучевая диагностика в стоматологии. – М.: ГЭОТАР-Медиа. 2010. – 175 с.
75. Васильев Ю. А. Цифровая микрофокусная технология рентгенографии в оценке анатомического строения зубов: экспериментальное исследование: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.13. – Санкт-Петербург, 2015. – 167 с.
76. Вахней С.Н. 3D Компьютерная томография в ортодонтии. – М.: Smashwords, 2019.
77. Ведешина Э.Г. Оптимизация современных методов диагностики и лечения пациентов с аномалиями и деформациями зубочелюстных дуг: дисс. ... докт. мед. наук: 14.01.14. – Пятигорск, 2019. – 374 с.
78. Велиханова Н.Р. Оценка ортодонтического и неврологического статуса у пациентов с дисфункцией височно-нижнечелюстного сустава: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2022. – 140 с.
79. Велиханова Н.Р., Дробышева Н.С., Васильченко В.В. и др. Диагностика заболеваний височно-нижнечелюстного сустава у ортодонтических пациентов с неврологическими синдромами // Ортодонтия. 2022. №1(97). С. 26- 29.
80. Величко Л. С., Белодед Л. В. Подготовка больного к зубному протезированию. – Минск: БГМУ, 2009. – 28 с.

81. Верховский А.Е., Апресян С.В., Степанов А.Г. Обзор результатов клинико-лабораторной оценки эффективности цифровых методов интеллектуального изготовления полных съёмных акриловых протезов // Российский стоматологический журнал. 2023. Т. 27. №6. С. 591-602.
82. Вишняков Г. Н., Лоцилов К.Е. Оптические схемы измерения формы трехмерных объектов методом проекции полос // Оптический журнал. 2011. № 2. С. 42-47.
83. Водолацкий В.М., Макатов Р.С. Ретенционный период у пациентов детского возраста с перекрестной окклюзией зубных рядов // Стоматология детского возраста и профилактика. 2021. № 2(78). С.118-121.
84. Воробьев А. А. и др. Анатомические компоненты улыбки //Оперативная хирургия и клиническая анатомия (Пироговский научный журнал). 2020. Т. 4. №. 3. С. 6–15.
85. Воробьев А. А. и др. К вопросу о классификации улыбки и ее стоматологических компонентов // Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. 2021. №. 1 (77). С. 178-183.
86. Ворожко А. А. Клинико-лабораторное обоснование использования зубных протезов из акриловой пластмассы и полиоксиметилена с учетом аллергического статуса пациента: дис. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Донецк. 2020. – 150 с.
87. Выходцева М.А. Применение 3D анализа для диагностики дисфункции височно-нижнечелюстного сустава: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2023. – 170 с.
88. Габдрафиков Р.Р. Усовершенствование диагностики и ортопедического лечения пациентов с декомпенсированной формой генерализованной патологической стираемости зубов: дисс. ... канд. медицинских наук: 14.01.14. – Самара, 2021. – 146 с.

89. Гаврилова М.В. Объективная и субъективная оценка эффективности лечения пациентов с дистальной окклюзией зубных рядов: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2023. – 211 с.
90. Гажва С.И., Зызов Д.М., Болотнова Т.В. и др. Сравнение дополнительных методов диагностики дисфункции височно-нижнечелюстного сустава // МНИЖ. 2017. №1-1 (55). С. 98-101.
91. Гажва С.И., Краснокутская Н.С., Касумов Р.С. Эпидемиологические аспекты и клинические результаты ортодонтического лечения детей от 7 до 12 лет // Медико-фармацевтический журнал «Пульс». 2021. Т.23. №3. С. 66-73.
92. Гайворонский И.В., Ничипорук Г.И., Гайворонский И.Н., Ничипорук Н.Г. Биоимпедансометрия как метод оценки компонентного состава тела человека (обзор литературы) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Медицина. 2017. №4. С. 365-184.
93. Геращенко С.М., Демидов А.В. Современные методы оценки состояния слизистой полости рта и пародонта // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. №2 (46). С. 154-171.
94. Гиоева Ю.А., Зангиева А.С., Сорокина Н.Д. и др. Оценка параметров антропометрического исследования челюстей, вариабельности сердечного ритма и постуральных нарушений у пациентов с дистальной и физиологической окклюзией // Ортодонтия. 2021. №3 (95). С. 9-17.
95. Глухова Н.В. Арсенина О.И., Попова Н.В. Ортодонтическое лечение взрослых пациентов со скелетной формой дистальной окклюзии с использованием функционального несъемного телескопического аппарата и скелетной опоры // Ортодонтия. 2021. № 3. С.4.
96. Глухова Н.В. Обоснование тактики и выбора способа ортодонтического лечения пациентов с дистальной окклюзией и протрузией резцов: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2022. – 129 с.

97. Голованич А.С., Киселева Е.А., Сергеева М.В. Эффективность миофункциональных трейнеров у детей при нарушении функции дыхания и наличии вредных привычек // Dental Forum. 2017. № 2. С. 37-39.
98. Гончарик И.Н. Обоснование выбора современных адгезивов, применяемых для фиксации брекетов, в практике врача-ортодонта: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Санкт-Петербург, 2024. – 164 с.
99. Гордиенко А.А. Особенности ортодонтического лечения взрослых при подготовке к протезированию // Вестник науки. 2019. №8 (17). С. 74-76.
100. Григоренко М. П., Брагин Е. А., Вакушина Е. А. и др. Вариабельность морфометрических показателей краниофациального комплекса у пациентов с дистальной окклюзией зубных рядов по данным 3d-цефалометрии // Медицинский вестник Северного Кавказа. 2022. № 17(2). С. 174-178.
101. Григоренко М.П. Цифровые подходы диагностики и лечения пациентов с аномалиями формы зубных дуг: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Ставрополь, 2024. – 236 с.
102. Григорович Э.Ш. Хронический генерализованный пародонтит: клинико-морфологические и молекулярно-генетические основы гетерогенности заболевания, обоснование прогноза и персонификация терапии: дисс. ... докт. мед. наук: 14.01.14. – Москва, 2016. – 327 с.
103. Грудянов А.И., Ерохин А.И. Хирургические методы лечения заболеваний пародонта. – М.: Медицинское информационное агентство, 2006. – 122 с.
104. Гуненко И. В., Смолина Е.С. Использование эстетического индекса ВОЗ для определения нуждаемости детей и подростков в ортодонтическом лечении // Институт стоматологии. 2007. №2- С.24-26
105. Гуськова А.А., Карпенко Ю.А., Архарова О.Н. и др. Возможности электромиографии в диагностике нарушений зубочелюстной системы // Наука молодых – Eruditio Juvenium. 2019. №4. С. 623-630.

106. Давыдов Б.Н., Доменюк Д.А., Кочконян Т.С. и др. Возрастная морфология назальной и гнатической частей краниофациального комплекса (часть I) // Институт стоматологии. 2022. № 2 (95). С. 58-60.
107. Данилова М.А., Пономарева М.Л., Царькова О.А., Веретенникова О.П. Анализ влияния скелетных трансформаций на изменение профиля лица у пациентов с сочетанной формой дистальной окклюзии зубных рядов и вертикальной резцовой дизокклюзией // Ортодонтия. 2014. №3(67). С.69-70.
108. Дегтев И.А., Казумян С.В., Билалова Ф.А. и др. Материалы для термоформования элайнеров // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. №4 (106). С. 123-125.
109. Деньга А.Э. Биофизические показатели тканей пародонта и жировой массы тела пациентов с метаболическим синдромом в процессе комплексного ортодонтического лечения // Вестник стоматологии. 2020. №1 (110). С. 35-40.
110. Джалалова М.В., Степанов А.Г., Апресян С.В., Оганян А.И. Численное исследование напряженно-деформированного состояния штифтовых культевых конструкций из диоксида циркония, изготовленных с использованием CAD/CAM технологий. Российский журнал биомеханики, 2023, № 1, С. 22-30.
111. Дзуев Б.Ю. Сравнительное исследование клинико-экономической эффективности внутриротовых и лабораторных реставраций зубов: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Москва, 2010. – 97 с.
112. Диагностика и лечение заболеваний височно-нижнечелюстного сустава / С.Ю. Иванов, В. В. Бекреев [и др.]. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021. – 112 с.
113. Дмитриенко Д.С., Шкарин В.В., Фомин И.В., Дмитриенко Т.Д. Клинические возможности применения методы фотостатической биометрии гипсовых моделей челюстей // Вестник волгоградского государственного медицинского университета. 2023. Т. 20. №4. С. 49-53.

114. Дмитриенко И.В. Результаты оценки ультразвуковой доплерографии на этапах ортодонтического лечения // Стоматология детского возраста и профилактика. 2022. № 22(2). С. 128-132.
115. Дмитриенко С.В., Шкарин В.В., Дмитриенко Т.Д. Методы биометрического исследования зубочелюстных дуг. – Волгоград, 2022. – 160 с.
116. Доменюк Д.А., Ведешина Э.Г., Дмитриенко С.В. и др. Анализ методов биометрической диагностики в трансверсальном направлении у пациентов с мезогнатическими типами зубных дуг // Кубанский научный медицинский вестник. 2017. Т. 24. № 6. С. 26– 34.
117. Доменюк Д.А., Ведешина Э.Г., Дмитриенко С.В. Использование основных анатомических ориентиров для определения соответствия размеров зубов параметрам зубочелюстных дуг // Стоматология детского возраста и профилактика. 2015. Т. 14. № 4 (55). С. 45– 50.
118. Доменюк Д.А., Ведешина Э.Г., Дмитриенко С.В. Корреляция размеров зубов с параметрами зубочелюстных дуг и челюстно-лицевой области по результатам исследования нативных препаратов черепов. Кубанский научный медицинский вестник. 2016. № 2. С. 71-79.
119. Доменюк Д.А., Давыдов Б.Н., Дмитриенко С.В. и др. Изменчивость кефалометрических показателей у мужчин и женщин с мезоцефалической формой головы и различными конституциональными типами лица (Часть II) // Институт Стоматологии. 2018. № 79. С. 82-85.
120. Дробышева Н.С., Мирзоев М.Л., Дробышев А.Ю. Взаимосвязь аномалии окклюзии зубных рядов и дисфункции височно-нижнечелюстного сустава // Ортодонтия. 2019. № 2 (86). С. 43–44.
121. Дробышева, Н.С., Велиханова Н.Р., Дробышев А.Ю. и др. Комплексный подход к лечению пациентов с дисфункцией височно-нижнечелюстного сустава // Ортодонтия. 2019. № 2 (86). С. 38-39.

122. Дякин Н.С., Зубкова А.А. Системы CAD/CAM проектирования: интраоральные сканеры в области инновационной стоматологии // Международный студенческий научный вестник. 2021. № 2. 4 с.
123. Ермаков А.В., Лосев А.В. Сравнительный обзор интраоральных сканеров для врачей-ортодонтот // Российская стоматология. 2023. №16(3). С. 44-48.
124. Есенин А. С., Гажва С. И., Тетерин А. И. Visagism как способ индивидуализации ортопедического лечения // Volgamedscience. 2020. С. 554-555.
125. Жданюк И.В. Клиническая и экономическая эффективность стоматологических лечебно-профилактических мероприятий перед зубным протезированием: автореф. дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14, 14.02.03. – Санкт-Петербург, 2013. – 23 с.
126. Жмырко И.Н. Дробышева Н.С., Слабковская А.Б. и др. Определение индекса степени выраженности зубочелюстно-лицевых аномалий // Ортодонтия. 2020. - №1. С. 12-20.
127. Жмырко И.Н. Обоснование применения комбинированного лечения у пациентов с аномалиями окклюзии зубных рядов, обусловленными нарушением развития челюстей: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2021. – 149 с.
128. Жулев Е. Н., Ершов П. Э., Ершова О. А. Влияние дистального смещения нижней челюсти на развитие постуральной патологии // Стоматология. 2018. Т. 97, № 5. С. 71-74.
129. Жулев Е.Н., Вокулова Ю.А. Изучение размерной точности моделей челюстей, полученных с помощью 3d-принтера по технологии стереолитографии // Кубанский научный медицинский вестник. 2020. №1. С. 40-48.
130. Забаева М.Н., Степанов А.Г., Апресян С.В., Семенова В.А. Методика оценки клинико-экономической эффективности

стоматологического лечения (на примере ортопедического планирования) // Микроэкономика. 2020. Т. 92, № 3. С. 44–55.

131. Золотарев Н.Н. Клинико-экономические эффекты применения 2D-планирования дизайна улыбки в комплексной ортопедической реабилитации пациента: дисс. ... канд. мед. наук. – Москва, 2023. – 107 с.

132. Золотарёв Н.Н., Апресян С.В., Степанов А.Г., Забаева М.Н. Клинико-экономическая эффективность 2D-программ планирования дизайна улыбки // Российский стоматологический журнал. 2022. Т. 26, № 6. С. 461–468.

133. Зражевская А.П., Суонио В.К., Апресян С.В., Степанов А.Г. Цифровое планирование ортопедической реабилитации пациентов с дефектами средней зоны лица. Актуальные вопросы стоматологии. Сборник научных трудов, посвященный основателю кафедры ортопедической стоматологии КГМУ, профессору Исаак Михайловичу Оксману. – Казань. – 2024. С.- 434-439

134. Зубков А.В., Тимощенко Т.В., Дудник О.В. Оптимизация дистализации моляров на элайнерах // Здоровье и образование в XXI веке. 2020. №4. С. 161-164.

135. Зубков В. Функциональная эстетика // Эстетическая стоматология. 2018. №. 3-4. С. 36-42.

136. Ибрагимов Т.И., Цаликова Н.А. Современные компьютерные технологии в ортопедической стоматологии: состояние и перспективы // Вестник ДГМА. 2013. Т. 8. № 3. С. 57-59.

137. Иваненко Т.А. Оценка морфофункционального состояния зубочелюстной системы и дифференциальная диагностика у пациентов с нарушениями движений нижней челюсти: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Москва, 2019. – 118 с.

138. Иванов С.Ю., Дмитриенко С.В., Доменюк Д.А. и др. Вариабельность морфометрических параметров зубных дуг и костных структур височно-нижнечелюстного сустава при физиологических вариантах

окклюзионных взаимоотношений // Институт стоматологии. 2021. №3. С.44-47.

139. Иванова О.П. Взаимосвязь размеров зубов с параметрами зубочелюстных дуг и краниофациального комплекса. Алгоритм определения соответствия // Современные проблемы науки и образования. 2018. № 2. 8 с.

140. Игнатьева Л.А., Хамитова Н.Х. Определение миофункциональных нарушений у детей в период сменного прикуса // Клиническая стоматология. 2018. № 1 (85). С. 61-63.

141. Инновационные решения в стоматологии / С. Д. Арутюнов, Р. Ш. Гветадзе, И. Ю. Лебеденко, А. Г. Степанов. – М.: ИД «Практическая медицина», 2019. – 120 с.

142. Искендеров Р.М. Медико-экономическая эффективность деятельности зуботехнической лаборатории при внедрении цифровых технологий: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14: 14.02.03. – Москва, 2018. – 181 с.

143. Истомина Е.В., Цаликова Н.А., Гончарова О.П. Ошибки при работе с механическими артикуляторами и лицевыми дугами на диагностическом этапе. Российская стоматология. 2015. № 8(1). С. 59-60.

144. Ищенко Е.А., Попов Н.В. Измерение параметров апикального базиса верхней челюсти по данным КЛКТ // Ортодонтия. 2022. №3 (99). С. 47.

145. Каганова О.С. Медико-экономическая эффективность профилактики и лечения зубочелюстных аномалий у детей в период раннего сменного прикуса: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Москва, 2019. – 233 с.

146. Калмин О.В., Корецкая Е.А., Горячева Е.В. Одонтометрические показатели у мужчин зрелого возраста с различными типами лица // Известия вузов. Поволжский регион. Медицинские науки. 2022. №1 (61). С. 50-61.

147. Карпанова А.С. Ортодонтическое лечение пациентов с аномалиями положения зубов и различным фенотипом десны: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2022. – 124 с.

148. Картышева Е.В. Особенности клинико-лабораторных показателей и гендерные отличия хронического генерализованного пародонтита у пациентов с метаболическим синдромом: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Москва, 2019. – 152 с.
149. Каскулова Д.З. Эффективность некоторых методов гигиены полости рта при применении ортодонтического лечения // Евразийский Союз Ученых. 2020. №5-6 (74). С. 45-47.
150. Катбех И., Косырева Т.Ф., Тутуров Н.С., Бирюков А.С. Оптимизация измерений зубных рядов в ортодонтической практике // Вестник РУДН. Серия: Медицина. 2019. №4. С. 373-380.
151. Кирсанова Е.В., Кондратьева Н.А., Аветисян Л.М. Цифровые методики диагностики и планирования ортодонтического лечения с использованием кортикальной опоры. Клиническая стоматология // 2021. № 1 (97). С. 102-107
152. Клестова И. А., Васильев А. Ю., Потрахов Н. Н. Значение панорамной микрофокусной рентгенографии в оценке стоматологического статуса и идентификации личности у военнослужащих по призыву // Радиология – практика. 2016. № 4 (58). С. 19-29.
153. Коваленко А.В. Оценка восприятия эстетики лица пациентами с гнатическими формами аномалий окклюзии до и после комбинированного лечения: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Москва, 2011. – 166 с.
154. Козин Е.В., Карманов А.Г., Карманова Н.А., Фотограмметрия. – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 142 с.
155. Кондратюк А.А. и др. Зависимость морфометрических параметров лица пациентов с горизонтальной формой повышенной стираемости зубов от тонуса жевательных мышц // Стоматологический научно-образовательный журнал. 2020. №3/4. С. 2-8.
156. Коннов В.В. Доменюк Д.А., Иванюта И.В., Иванюта О.О. Оптимизация тактики лечения пациентов с дистальной окклюзией зубных

рядов по результатам функциональных и клиникорентгенологических исследований височно-нижнечелюстного сустава // Медицинский алфавит. 2019. №3(23). С. 58-63.

157. Копецкий И. С., Побожьева Л. В., Шевелюк Ю. В., Копецкая А. И. Биотип пародонта: анатомические особенности и взаимосвязь с окружающими тканями // Российский медицинский журнал. 2020. Т. 26. № 2. С. 114-119.

158. Косолапова И.В., Дорохов Е.В., Коваленко М.Э., и др. Мобильное приложение для контроля и нормализации функционального состояния жевательной мускулатуры // Стоматология детского возраста и профилактика. 2022. № 22(2). С. 122-127.

159. Костина И.Н., Кочмашева В.В. Ультразвуковая визуализация височно-нижнечелюстного сустава в норме // Проблемы стоматологии. 2016. №2. С. 95-101.

160. Костромин Б.А. Совершенствование ранней диагностики заболеваний височно-нижнечелюстных суставов у пациентов, проходящих ортопедическое стоматологическое лечение: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Уфа, 2020. – 144 с.

161. Костырин Е.В., Багдасарян Г.Г. Управление развитием стоматологической помощи с использованием цифровых технологий // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023): Труды Шестнадцатой международной конференции, Москва, 26-28 сентября 2023 года. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2023. – С. 1553-1564.

162. Костюкова В.В. Сравнительное исследование различных систем для внутриротового цифрового сканирования зубных рядов: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Москва, 2017. – 115 с.

163. Косых Б.А., Ежицкий П.М. Использование метода аксиографии в диагностике заболеваний височно-нижнечелюстного сустава // БМИК. 2019. №7. С. 300.

164. Куватбаева У. А. Факторы риска заболеваний пародонта у лиц с брекет-системами (по данным литературы) // Вестник КазНМУ. 2017. № 3. С. 183-186.
165. Куватбаева У.А. Факторы риска заболеваний пародонта у лиц с брекет-системами (по данным литературы) // Вестник Казахского Национального медицинского университета. 2017. № 3. С.179-184.
166. Кузнецов И.В. Халиман В.В., Фалеева Е.В., Пономарчук Ю.В. Анализ алгоритмов шумоподавления и классификации при распознавании движений на базе поверхностной электромиографии // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 30-42.
167. Кузнецова М.Ю., Севбитов А.В., Дорофеев А.Е. и др. Анализ результатов ретенции у пациентов, проходящих ортодонтическое лечение на съемной аппаратуре // Актуальные проблемы медицины. 2020. Т. 43. № 3. С. 412-423.
168. Кузьменко Е. В. и др. Эффективность использования фотостата для фотограмметрии фаса и профиля лица в ортодонтии / // Медэлектроника – 2020. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. ст. XII Межд. науч.-тех. конф. Минск, 10 декабря 2020 г. – Минск: БГУИиР, 2020. – С. 76–80.
169. Кулаков С.А. Применение фибротомии и вибропневмостимуляции для предупреждения рецидива скученного положения зубов в переднем отделе челюстей после ортодонтического лечения: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Самара, 2019. – 142 с.
170. Куроедова В. Д., Макарова А. Н. Распространенность зубочелюстных аномалий у взрослых и доля асимметричных форм среди них // СМБ. 2012. №4. С. 31-35.
171. Кучкарова Р., Абдусаматова И. Влияние эволюции и эмбриогенеза челюстного аппарата на развитие зубочелюстных аномалий и

предрасположенность к кариесу. Актуальные проблемы стоматологии и челюстно-лицевой хирургии. 2022. Т. 5 № 1(02). С. 36-38.

172. Ланина А.Н. Разработка и клиническое обоснование применения метода количественной оценки зубочелюстно-лицевых аномалий: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Великий Новгород, 2019. – 179 с.

173. Лебеденко И. Ю., Апресян С. В. Цифровое планирование улыбки // Научный посыл высшей школы-реальные достижения практического здравоохранения. 2018. С. 874–876.

174. Ленденгольц Ж.А., Картон Е.А., Вагапов З.И. Применение конусно-лучевой компьютерной томографии в ортодонтии // Ортодонтия. 2010. №4(52). С. 6-9.

175. Лесняков А.Ф., Волох М.А., Кирилловский М.А. Возможности применения технологии 3D-сканирования для объемной визуализации в пластической хирургии лица // Вестник Северо-Западного государственного медицинского университета им. И. И. Мечникова. 2016. №1. С. 7-12.

176. Лосев Ф.Ф., Попова Н.В., Арсенина О.И. и др. Количественная объективная и субъективная оценка качества лечения пациентов с дистальной окклюзией зубных рядов // Стоматология. 2022. Т. 101. № 3. С. 76-82.

177. Лосев Ф.Ф., Попова Н.В., Арсенина О.И. и др. Оценка результатов ортодонтического лечения пациентов со скелетными аномалиями по сагиттали на основании конусно-лучевой компьютерной томографии // Клиническая стоматология. 2022. № 25 (1). С. 81-90.

178. Любимый Н.С., Польшин А.А., Тихонов А.А., Анциферов С.И., Герасимов М.Д., Мелентьев Н.А. Оценка экономической эффективности технологии изготовления композитных металл-металлополимерных деталей в сравнении с аддитивной и субтрактивной технологиями // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2022. №5. С. 91-105.

179. Лян Д.В. Особенности диагностики и лечения пациентов со скелетными формами зубочелюстных аномалий и синдромом гипертонуса

жевательной мускулатуры: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2021. – 175 с.

180. Mauri D.A., Petrini M., Vitale D. et al. Alkaline Phosphatase level in gingival Crevicular fluid during treatment with Quad-Helix // J. Biol. Regul. Homeost. Agents. 2015. Vol. 29(4). P. 1017-1023.

181. Майборода Ю. Н., Хорев О.Ю. Нейромышечная и суставная дисфункция височно-нижнечелюстного сустава // Кубанский научный медицинский вестник. 2017. Т. 24, № 3. С. 142-148.

182. Макаров Р.С. Ретенционный период после лечения сочетанной аномалии окклюзии зубных рядов у детей и подростков: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Ставрополь, 2023. – 180 с.

183. Макатов Р.С. Ретенционный период после лечения сочетанной аномалии окклюзии зубных рядов у детей и подростков: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Ставрополь, 2023. – 180 с.

184. Македонова Ю. А., Поройский С. В., Фирсова И. В., Федотова Ю. М. Лазерная доплеровская флоуметрия при заболеваниях слизистой полости рта // Волгоградский научно-медицинский журнал. 2016. № 1. С. 51-53.

185. Макеева М.К., Корзун А.Л., Апресян С.В., Степанов А.Г., Московец О.О., Геворкян А.А. Окклюзионная зубная шина : пат. 227232 РФ. МПК А61С 7/00; заявл. 28.05.2024; опубл. 11.07.2024, Бюл. № 5. - 7 с.

186. Макеева М.К., Корзун А.Л., Апресян С.В., Степанов А.Г., Московец О.О., Геворкян А.А. Способ выполнения терапевтической санации полости рта в период лечения мышечно-суставной дисфункции : пат. 2830400 РФ. МПК А61С 7/00; заявл. 28.05.2024; опубл. 18.11.2024, Бюл. № 32. - 8 с.

187. Маланова О.А., Морозова Н.С., Гринин В.М. и др. Распространенность и интенсивность зубочелюстных аномалий у воспитанников детских домов // Стоматология детского возраста и профилактика. 2023. № 23(4). С. 329-335.

188. Малыгин Ю.М. Взаимосвязь формирования и прорезывания зубов с ростом челюстей в процессе развития зубочелюстной системы. – М.: ЦОЛИУВ, 1976. – 32 с.
189. Мансур Ю.П. Оценка качества жизни взрослых пациентов с ортодонтической патологией: дисс. ... канд. мед. наук: 14.02.05. – Волгоград, 2015. – 152 с.
190. Мансур Ю.П., Щербаков Л.Н. Роль окклюзионной терапии в комплексном лечении синдрома болевой дисфункции ВНЧС у пациентов с аномалиями и деформациями зубных рядов. Российский журнал боли. 2021. № 19(1). С. 15-18.
191. Марков Н.М. Ортодонтические мероприятия при подготовке к протезированию пациентов с дефектами и деформациями зубных рядов: дисс. ... канд. мед. наук: 14.00.21. – Москва, 2009. – 105 с.
192. Матросов В.В. Усовершенствование ортопедического лечения пациентов с полным отсутствием коронковой части зуба: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Самара, 2020. – 141 с.
193. Махортова П.И. Клинико-рентгенологическое сравнение методов комбинированного лечения пациентов с сужением верхней челюсти: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Москва, 2020. – 160 с.
194. Меженин А.В. Тозик В.Т. Определение подобия 3D полигональных объектов в интеллектуальных системах // Труды международных научно-технических конференций «Интеллектуальные системы» (AIS'07) и «Интеллектуальные САПР» (CAD-2008). – М.: Физматлит, 2008, Т.2. – С. 27-32.
195. Методики индексной оценки состояния твердых тканей зуба и тканей пародонта; составит.: А.А. Адамчук, Н.В. Лапина, В.В. Таиров, В.А. Иващенко, О.В. Байбакова, А.Н. Бондаренко. – Краснодар, Изд-во «Плехановец», 2022. – 122 с.

196. Московец О.О. Анализатор биоимпедансных обменных процессов // В кн.: Ортодонтия. Национальное руководство. В 2 т. Т. 1 Диагностика зубочелюстных аномалий / под ред. Л.С. Персина. – М.: ГЕОТАР-Медиа. 2020. – С. 268-270.
197. Московец О.О. Оценка функционального состояния тканей пародонта у пациентов с дистальной окклюзией: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Москва, 2021. – 143 с.
198. Московец О.О., Слабковская А.Б., Московец О.Н. Гидратация внеклеточной среды тканей пародонта в динамике ортодонтического лечения у пациентов с дистальной окклюзией // Клиническая стоматология. - 2021. - Т. 24, № 3. - С. 98-103. DOI: 10.37988/1811-153X_2021_3_98. EDN TRVYVG.
199. Мотоусова С. А., Сайпеева М. М., Бимбас Е. С. Сравнение способов измерения кефалометрических параметров // Актуальные вопросы современной медицинской науки и здравоохранения: Мат. V Межд. науч.-практ. конф. молодых учёных и студентов, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне, 90-летию УГМУ и 100-летию медицинского образования на Урале, Екатеринбург, 09–10 апреля 2020 года. Т. 3. – Екатеринбург: ФГБОУ ВО "Уральский государственный медицинский университет" Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2020. – С. 242-247
200. Мохирев М.А., Каганова О.С., Олесова В.Н. и др. Рентгенологическая оценка структурно-топографических параметров височно-нижнечелюстного сустава после ортогнатического хирургического лечения зубочелюстных аномалий с явлениями кондилорезорбции // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67, № 4. С. 57-61.
201. Муртазаев С.С., Кучкарова М.К., Маматкулов Ш.А., Хамиджонова З.Б. Фронтальная цефалометрия при диагностике и

ортодонтическом лечении аномалий зубочелюстной системы // Вестник науки и образования. 2022. №8 (128). С. 67-72.

202. Налбандян М.С. Тер-Погосян Г.Ю., Есаян Л.К., Казарян Э.Р. Роль эстетики в современной ортодонтической диагностике и лечении // Проблемы стоматологии. 2018. Т. 14, № 3. С. 86-90.

203. Нанда Р. Биомеханика и эстетика в клинической ортодонтии; пер. с англ. [А. В. Коваленко]. – 2-е изд. – М.: МЕДпресс-информ, 2016. – 386 с.

204. Наумович С. А. и др. Голографические методы исследования в стоматологии: монография. – Минск: БГМУ, 2009. – 172 с.

205. Наумович С. А. и др. Принципы ортопедического лечения патологической стираемости зубов. – Минск: БГМУ, 2020. – 47 с.

206. Начарьян Д. Г., Апресян С. В., Степанов А. Г., Копылов М.В., Московец О.О. Клиническая эффективность дифференцированных протоколов комплексной ортопедической реабилитации пациентов с дисфункцией височно-нижнечелюстного сустава. Проблемы стоматологии. 2026; 2: 37-42. DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-2-37-42.

207. Начарьян Д.Г., Апресян С.В., Степанов А.Г., Копылов М.В., Московец О.О. Клиническая эффективность применения индивидуального программируемого прикусного блока для профилактики провокации симптомов дисфункции височно-нижнечелюстного сустава // Проблемы стоматологии. - 2026. - № 2. - С. 37-42. DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-2-37-42.

208. Начарьян Д.Г., Апресян С.В., Степанов А.Г., Московец О.О., Бутков Д.С. Цифровые протоколы комплексной ортопедической реабилитации пациентов с синдромом болевой дисфункции височно-нижнечелюстного сустава (обзор литературы) // Проблемы стоматологии. - 2025. - № 2. - С. 37-42. DOI: 10.18481/2077-7566-2025-21-2-37-42.

209. Негрескул А.Г., Киященко А.И., Мутигуллина А.И., Мкртчян А.С. Цифровые технологии в стоматологии. Плюсы использования

интраорального сканирования по сравнению с аналоговыми слепками // Междисциплинарный студенческий научный вестник. 2022. № 2. 6 с.

210. Нётцель Ф., Шульц К. Практическое руководство по ортодонтической диагностике. Анализ и таблицы для использования в практике. – Львов: ГалДент, 2006. – 176 с.

211. Никитина Л.И., Громова А.А. Междисциплинарное стоматологическое лечение первичной адентии латеральных резцов верхней челюсти // Acta Medica Eurasica. 2022. №4. С. 47-57.

212. Николаев А.Е., Кадиева А.Ш., Шапиев А.Н. и др. Лучевая диагностика заболеваний зубочелюстной системы у детей и подростков // Вопросы практической педиатрии. 2019. № 14 (2). С.43-54.

213. Николаев В.Г., Шестак Д.О., Бакшеева С.Л., Ефремова В.П. Особенности одонтометрических параметров у девушек с различными типами лица // Журнал анатомии и гистопатологии. 2018. №7(3). С. 35-38.

214. Ниметуллаев Л.Т. Компьютерное проектирование как метод изучения // Вестник хирургии Казахстана. 2012. №3 (31). С. 91.

215. Ничипор Е.А. Возможности микрофокусной конусно-лучевой компьютерной томографии в визуализации стоматологических материалов и инородных объектов: экспериментальное исследование: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.13. - Москва, 2021. – 143 с.

216. Новик М.А. Совершенствование ортопедического лечения пациентов с патологией височно-нижнечелюстного сустава с использованием отечественного безмономерного фотополимеризационного материала: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2022. – 181 с.

217. Оборотистов Н. Ю., Мураев А. А., Иванов С. Ю. и др. 3D-цефалометрия лица с применением искусственного интеллекта // Ортодонтия. 2023. № 1(101). С. 6-15.

17. Оклюзионная зубная шина: Пат. 227232 РФ. МПК А61С 7/00 / М.К. Макеева, Корзун А.Л., С.В. Апресян, А.Г. Степанов, О.О. Московец, А.А. Геворкян; заявл.28.05.2024; опуб. 11.07.2024, Бюл. №5 –7с.
218. Олесов Е.Е., Каганова О.С., Миргазизов М.З. и др. Трудовые и финансовые затраты при лечения зубочелюстных аномалий в период сменного прикуса // Российский стоматологический журнал. 2019. №2. С. 76-79.
219. Ортодонтия. Национальное руководство. В 2 т. Т. 1. Диагностика зубочелюстных аномалий / под ред. Л. С. Персина. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2020. – 304 с.
220. Ортодонтия: современные методы диагностики аномалий зубов, зубных рядов и окклюзии / Л. С. Персин, [А. Б. Слабковская, Картон Е. А. и др.]. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021 – 160 с.
221. Осипов Г.Г., Абрамянц А.А., Чикунев С.О. и др. Полностью цифровой протокол планирования и реабилитации пациента с заболеванием ВНЧС. Внедрение методики и клиническое наблюдение // Институт стоматологии. 2024. № 102. С. 26-29.
222. Панферова О.И. Онконастороженность как компонент стоматологического здоровья у пациентов с риском развития злокачественных новообразований полости рта: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7, 3.1.6. – Москва, 2022. – 200 с.
223. Пархамович С.Н., Битно В.Л., Битно М.В. Сравнительный анализ современных методов регистрации шарнирной оси (обзор) // Современная стоматология. 2020. №1 (78). С. 80-85.
224. Патент № 2811262 «Способ оценки состояния верхних дыхательных путей с использованием цифровых технологий» от 11.01.2024 г.
225. Патент № 2813296 «Способ биометрической диагностики моделей челюстей с использованием цифровых технологий» от 09.02.2024 г.

226. Персин Л.С и др. Ортодонтия. Диагностика и лечение зубочелюстно-лицевых аномалий и деформаций. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016. – 640 с.
227. Персин Л.С. Ортодонтия. Национальное руководство: Лечение зубочелюстных аномалий: [в 2 т.]. – М.: ГЭОТАР – Медиа. 2020. Т.2. – 376 с.
228. Песенко Е.В. Клинико-рентгенологическое обоснование применения несъемных ортодонтических аппаратов при лечении пациентов с сужением верхней челюсти в период 6–12 лет: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2023. – 153 с.
229. Петровская В. В. Лучевая диагностика врожденных расщелин губы, нёба и альвеолярного отростка до и после костной аутопластики: автореф. дис. ... докт. мед. наук: 14.01.13. – Москва, 2016. – 42 с.
230. Петровская В.В., Потрахов Н.Н., Васильев А.Ю. Конусно-лучевая компьютерная томография в анализе эндодонтического лечения зубов (в эксперименте) // ВРР. 2019. №2. С. 89-94.
231. Пилипенко Н.Д., Максюков С.Ю. Оценка точности прогнозирования расширения верхнего зубного ряда с применением программного обеспечения ClinCheck // Российский стоматологический журнал. 2021. Т. 25. №2. С. 159-166.
232. Полилов Д. Электронная медицинская карта ортодонтического пациента // Опыт и практика. 2019. № 1/2 (21/22). С. 70-71.
233. Полховский Д.М. Применение компьютерных технологий в стоматологии // Современная стоматология. 2008. №1. С. 24-27.
234. Польша Л.В. Диагностика эстетических нарушений и планирование комплексной реабилитации пациентов с сагиттальными аномалиями окклюзии: автореф. дис. ... докт. мед. наук. – Москва, 2009. – 49 с.

235. Польша Л.В., Персин Л.С., Черемисова В.С. Применение «Золотой маски красоты» Dr. Marquardt и индексов пропорциональности для экспресс-анализа привлекательности лица // Ортодонтия. 2007. № 3. С. 75-76.
236. Польша Л.В., Черемисова В.С. Анализ индивидуализированной гармонии и баланса лица у пациентов с мезиальной окклюзией // Ортодонтия. 2009. № 1 (45). С. 79.
237. Полякова В.В. Диагностика эстетических нарушений и прогнозирование результатов лечения у взрослых пациентов с зубочелюстными аномалиями, сопровождающимися сужением верхнего зубного ряда: автореф. дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Пермь, 2017. – 20 с.
238. Пономарев А. В., Постников М. А., Трунин Д. А. Оценка эффективности ортопедического лечения дисфункции височно-нижнечелюстного сустава по данным математического моделирования // Стоматолог. 2018. № 1(28). С. 96-102.
239. Пономарев О.Ю., Иванов Д.И., Кожевин М.В. Комплексная реабилитация в цифровом протоколе // Dental Magazine. 2019. № 10.
240. Попов С.А. Лечение дистальной окклюзии у подростков с учетом динамики роста и морфофункционального состояния зубочелюстного аппарата. – Казань: ООО «Бук», 2019. – 198 с.
241. Попова Н.В. Арсенина О.И., Глухова Н.В., Гаврилова М.В. Алгоритм лечения пациентов с нижней ретрогнатией, отказавшихся от костно-реконструктивной операции // Стоматология. 2021. Т.100, №2. С.64-72.
242. Попова Н.В. Арсенина О.И., Лебедеко И.Ю. и др. Экспериментальное исследование отечественного ортодонтического мини-винта // Стоматология. 2021. Т.100№3. С.7-12.
243. Попова Н.В. Комплексное лечение пациентов со скелетными формами сагиттальных аномалий окклюзии зубных рядов (клинико-рентгенологическое исследование): Дис. ...докт. мед. наук: 3.1.7. – Москва. 2022. – 371 с.

244. Попова Н.В., Арсенина О.И., Лебеденко И.Ю. и др. Анализ стабильности ортодонтических минивинтов в экспериментальных и клинических условиях // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия: Медицинские науки. 2021. №2 (23). С. 32-38.

245. Попова Н.В., Арсенина О.И., Махортова П.И. и др. Комбинированное ортодонтно-хирургическое лечение взрослых пациентов с зубочелюстными аномалиями и деформациями зубных рядов // Стоматология. 2020. № 2. С. 66-78.

246. Попова Н.В., Арсенина О.И., Попова А.В. и др. Альтернативные методы лечения взрослых пациентов с нижней ретрогнатией и дистальной окклюзией зубных рядов // Актуальные проблемы и перспективы развития стоматологии в условиях Севера. Якутск. 2021. С.323-329.

247. Попова Н.В., Арсенина О.И., Хворостенко Е.А. Сравнение стабильности мини-винтов (Экспериментальное исследование) // Ортодонтия. 2021. №3(95). С. 65-66.

248. Постников М.А. Оптимизация ортодонтического лечения детей с мезиальной окклюзией в период смены и после смены зубов: дисс. ... докт. мед. наук: 14.01.14. – Самара, 2016. – 316 с.

249. Постников М.А. Ортодонтия. Этиология, патогенез, диагностика и профилактика зубочелюстных аномалий и деформаций. Ч.1. – Самара: Право, 2022. – 345 с.

250. Постников М.А., Андриянов Д.А., Осадчая Е.И. Диагностика морфофункционального состояния височно-нижнечелюстного сустава с применением метода ультразвукового исследования у пациентов с аномалиями прикуса // Вестник академии наук Молдовы. Медицина. 2020 № 2(66). С. 206-214.

18. Прикусной блок для фиксации челюстей. Пат. 2844632 РФ. МПК А61С 8/00. Апресян С.В., Степанов А.Г., Начарян Д.Г., Копылов М.В.

Московец О.О. Заявл. № 2025102909 от 11.02.2025; опуб. 04.08.2025, Бюл. №2 – 7 с.

19. Программа для планирования ортодонтического лечения СМАРТ-ОРТО. Апресян С.В., Степанов А.Г., Московец О.О., Малиева Э.А. Заявка № 2024669938. Свидетельство № 2024681396 от 28.08.2024.

251. Пропедевтический курс по ортопедической стоматологии и ортодонтии / Е.А. Вакушина, Е.А. Брагин, П.А. Григоренко [и др.] – Ставрополь: СтГМУ, 2022. – 172 с.

252. Протокол анализа конусно-лучевой компьютерной томографии у больных с краниомандибулярной дисфункцией / Е. А. Булычева, А. А. Мамедов, А. М. Дыбов [и др.] // Стоматология. 2020. Т. 99, № 6. С. 94-100.

253. Раджабова А.Н., Абдулмеджидова Д.М. Дополнительные исследования больных с заболеваниями пародонта. – Махачкала: ДМСИ, 2013. – 50 с.

254. Розов Р.А., Трезубов В.Н., Шалагинова А.В., Кусевицкий Л.Я. Сравнительная оценка *in vitro* точности стоматологических сканеров открытого типа при получении модели зубного ряда. Пародонтология. 2020. № 25(3). С. 231-236.

255. Рощин Е.М., Пантелеев В.Д., Пантелеев С.В. Диагностика нарушений артикуляции нижней челюсти у пациентов с дисфункциями височно-нижнечелюстного сустава // Стоматология. 2011. №1. С.26-30

256. Рубникович С. П., Костецкий Ю. А., Грищенко А.С. 3D-печать в ортопедической стоматологии: особенности, применение, технологии. – Минск: БелМАПО, 2023. – 53 с.

257. Рубникович С.П., Корхова Н.В., Тимчук Я.И. Сравнительная характеристика антропометрических методов диагностики у пациентов с постоянным прикусом // Вестник ВГМУ. 2017. Т. 16. № 5. С. 105-111.

258. Рудаков В.А. Влияние металлических и безметалловых каркасов искусственных коронок на состояние десны у опорных зубов и имплантатов: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Москва, 2013. – 123 с.
259. Рыбаков А. Оптимизация ортодонтического лечения на основе нейронных сетей, анализа конечными элементами и цифровых карт слизистой полости рта: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Санкт-Петербург, 2024. – 235 с.
260. Рыжова И.П., Максимова В.М., Гонтарев С.Н. и др. Анализ факторов, влияющих на качество и долговечность фиксации несъемных конструкций зубных протезов (обзор литературы) // Вестник новых медицинских технологий. 2023. Т. 30. № 2. С. 53-57.
261. Ряховский А.Н., Бойцова Е.А. 3D-анализ височно-нижнечелюстного сустава и окклюзионных взаимоотношений на основе компьютерного виртуального моделирования // Стоматология. 2020. Т.99. №2. С.102-109.
262. Ряховский А.Н., Выходцева М.А. Обоснование методики 3D-анализа височно-нижнечелюстного сустава по данным компьютерной томографии // Стоматология. 2022. Т.101. №1. С.23-32.
263. Ряховский А.Н., Лосев Ф.Ф., Алтынбеков К.Д., Выходцева М.А. Цифровой 3D анализ анатомических и функциональных параметров ВНЧС и их корреляция // Стоматология. 2022. Т.101. №3. С.49-60.
264. Ряховский А.Н., Степанов А.Г., Апресян С.В., Золотарев Н.Н. Сочетанное использование результатов 2D- и 3D-моделирования для идентичного воспроизведения прототипа улыбки. Клинический случай // Клиническая стоматология. 2021. Т. 24. № 4. С. 92-95.
265. Саврасова Н. А. и др. Применение конусно-лучевой компьютерной томографии в стоматологии. – Минск: БГМУ, 2016. – 44 с.
266. Салеева Г.Т. Гришин П.О., Салеев Р.А., Калининкова Е.А. Напряженно-деформированное состояние в кости и интерфейсе «имплантат – кость» // Проблемы стоматологии. - 2022. Т. 18, №3. С. 80-89.

267. Самусенков В.О. Клинико-лабораторный мониторинг применения фотодинамической терапии в комплексном лечении воспалительных заболеваний полости рта: дисс. ... канд. докт. мед. наук: 3.1.7; 1.5.11. – Москва, 2022. – С. 262.
268. Саркисов Д.С., Степанов А.Г., Апресян С.В. Физико-механические свойства материалов, используемых в технологии компьютерного производства хирургических шаблонов // Стоматология. 2024. № 103(1). С. 8-11.
269. Сафарова Н.М. Ортодонтическое лечение пациентов со скученным положением зубов с использованием корригирующих эластомерных капп: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Москва, 2014. – 177 с.
20. Светоотверждаемая композиция для 3Д-печати разобщающих прикусных накладок. Пат. 2853878 РФ. МПК А61С 8/00. Будников С.Ю., Белов К.К., Корнилов К.В., Иту И.И., Апресян С.В., Степанов А.Г., Московец О.О., Малиева Э.А., Заявл. № 2024126459 от 09.09.2024; опуб. 26.12.2025, Бюл. №36–5 с.
270. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614858 Российская Федерация. Анкета оценки состояния пациента после ортодонтического лечения: № 2021612690: заявл. 05.03.2021: опубл. 30.03.2021 / В. Э. Тихонов, А. В. Кузнецов, О. Н. Архарова [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Минздрава России. – EDN JVVZDA.
271. Седов Ю.Г., Аванесов А.М., Салеев Р.А. и др. Классификация вариантов применения хирургических направляющих шаблонов для дентальной имплантации // Стоматологии. 2021. Т. 100, №1. С. 84-88.
272. Селескериди В.В. Эффективность комплексного лечения пациентов с аномалиями окклюзии II класса: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Ставрополь, 2020. – 179 с.

273. Семенова В.А. Оптимизация и подтверждение клинико-экономической эффективности протокола зубного протезирования пациентов с полным отсутствием зубов с использованием цифровых стоматологических технологий: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2022. – 183 с.

274. Семкин В.А. Сысолятин П.Г. Заболевания и повреждения височнонижнечелюстного сустава // Челюстно-лицевая хирургия: национальное руководство/под ред. А.А. Кулакова. Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2019. С. 283-357.

275. Сергеева М.В. Медико-социальные аспекты профилактики стоматологических заболеваний в сформированном постоянном прикусе: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Кемерово, 2022. – 183 с.

276. Силин А.В., Ицкович И. Э., Бутова А. В. Магнитно-резонансная томография в комплексном обследовании жевательных мышц и мониторинге результатов лечения мышечно-суставной дисфункции височно-нижнечелюстных суставов // Ортодонтия. 2018. № 3(83). С. 18-24.

277. Силин А.В., Семелева Е.И., Цинзерлинг Н.В. Коррекция хронической боли у пациентов с мышечно-суставной дисфункцией височно-нижнечелюстных суставов с помощью лечебной физкультуры // XXI Давиденковские чтения: сб. тезисов. – СПб., 2019. - С. 287-288.

278. Сойхер М.И., Орлова О.Р., Сойхер М.Г. и др. Клинико-экономическое исследование эффективности ботулинотерапии при купировании миогенных стоматологических синдромов // Российский стоматологический журнал. 2017. №6. С. 308-312.

279. Соколова В.Н., Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю. и др. Микрофокусная конусно-лучевая компьютерная томография в эксперименте по оценке положения кохлеарного импланта // Биотехносфера. 2017. № 4 (52). С. 20-23.

280. Спицына О.Б. Оценка качества ортодонтического лечения пациентов с различными формами зубочелюстных аномалий: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Тверь, 2018. – 153 с.

21. Способ выполнения терапевтической санации полости рта в период лечения мышечно-суставной дисфункции: Пат. 2830400 РФ. МПК А61С 7/00 / Макеева М.К., Корзун А.Л., С.В. Апресян, А.Г. Степанов, О.О. Московец, А.А. Геворкян; заявл.28.05.2024; опуб. 18.11.2024, Бюл. №32 –8 с.

22. Способ профилактики патологии височно-нижнечелюстного сустава во время стоматологического лечения. Пат. 2843790 РФ. МПК А61С 8/00. Апресян С.В., Степанов А.Г., Начарян Д.Г., Московец О.О., Копылов М.В. Заявл. № 2025102907 от 11.02.2025; опуб. 18.07.2025, Бюл. №20 – 10 с.

23. Способ устранения дистальной окклюзии зубных рядов Пат. 2825047 РФ. МПК А61С 7/00 / С.В. Апресян, А.Г. Степанов, О.О. Московец, К.С. Апресян; заявл.20.02.2024; опуб. 19.08.2024, Бюл. №23 –12с.

281. Староверов Н.Е., Грязнов А. Ю., Потрахов Н. Н. и др. Новые методы цифровой обработки микрофокусных рентгеновских изображений // Медицинская техника. 2018. № 6 (312). С. 53-55.

282. Степанов А.Г., Апресян С.В. Цифровое планирование в хирургической стоматологии.: Практическое пособие / А.Г. Степанов, С.В. Апресян – М.: Мозартика. 2021 – 128 с.

283. Степанов А.Г., Апресян С.В., Джалалова М.В. Инновационные зубосохраняющие технологии: монография. – М.: Московские Учебники, 2022. – 224 с.

284. Степанов Г.В., Дикова А.А., Ульянова Л.Г. Применение модифицированного ортодонтического устройства для лечения пациентов с дистальной окклюзией // Ортодонтия. 2016. № 2 (74). С. 81.

285. Степанян Ю.Ф. Сравнительный анализ конусно-лучевых компьютерных томографов и программного обеспечения анализа полученных данных // БМИК. 2019. №7. С. 306-307.

286. Ступницкий А. В., Панкратова Н.В., Картон Е. А. и др. Состояние гемодинамики пародонта на этапах ортодонтического лечения у пациентов с разной толщиной альвеолярного отростка в области верхних боковых зубов. Часть I // Институт стоматологии. 2019. № 1. С. 67-69.

287. Ступницкий А. В., Панкратова Н.В., Картон Е. А. и др. Состояние гемодинамики пародонта на этапах ортодонтического лечения у пациентов с разной толщиной альвеолярного отростка в области верхних боковых зубов. Часть II // Институт стоматологии. 2019. № 2. С. 59-61.

288. Ступницкий А.В. Клинико-функциональная оценка реакций тканей пародонта на применяемые силы при ортодонтическом лечении: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2022. – 118 с.

289. Ступницкий А.В., Картон Е.А., Панкратова Н.В., Постников М.А., Московец О.О. Состояние гемодинамики пародонта боковых зубов у ортодонтических пациентов при смене нитиноловых дуг различного сечения // Ортодонтия. - 2018. - № 4(84). - С. 52-61. EDN FQYUJY.

290. Ступницкий А.В., Панкратова Н.В., Картон Е.А., Персин Л.С., Постников М.А., Московец О.О. Состояние гемодинамики пародонта на этапах ортодонтического лечения у пациентов с разной толщиной альвеолярного отростка в области верхних боковых зубов (Часть II) // Институт стоматологии. - 2019. - № 2(83). - С. 59-61. EDN WBYIAP.

291. Ступницкий А.В., Панкратова Н.В., Картон Е.А., Персин Л.С., Постников М.А., Московец О.О. Состояние гемодинамики пародонта на этапах ортодонтического лечения у пациентов с разной толщиной альвеолярного отростка в области верхних боковых зубов (Часть I) // Институт стоматологии. - 2019. - № 1(82). - С. 56-59. EDN KYFLHF.

292. Стяжкин Н.В. Дифференциальный подход к диагностике и лечению пациентов с зубочелюстными аномалиями и функциональными нарушениями височно-нижнечелюстного сустава: дисс. ... канд. мед. наук. 3.1.7. – Екатеринбург, 2023. – 158 с.

293. Субботин Р.С., Фищев С.Б., Лепилин А.В. и др. Сравнительная характеристика тонуса жевательных мышц у пациентов с компенсированной и декомпенсированной повышенной стираемостью зубов. Пародонтология. 2019. № 24(2). С. 150-156.
294. Сулейманова Л.М., Гордина Е.С., Мержевинская Е.И. Совершенствование методов диагностики зубочелюстных аномалий с использованием конусно-лучевой компьютерной томографии // Ортодонтия. 2017. Т. 79. № 3. С. 91-92.
295. Султанов А.А., Первов Ю.Ю., Яценко А.К. и др. Опыт применения комплексного подхода в диагностике дисфункции височно-нижнечелюстного сустава // ТМЖ. 2021. №4 (86). С. 98-100
296. Тарасенко С. В., Серова Н. С., Морозова Е. А. Интраоперационный микрофокусный рентгенологический контроль эффективности лечения пациентов с корневыми кистами челюстей // Российский электронный журнал лучевой диагностики. 2017. Т. 7. № 1. С. 39-45.
297. Тараткина Д.С. Особенности ортодонтического лечения пациентов, имеющих новообразования челюстно-лицевой области // Вестник медицинского института «Реавиз»: реабилитация, врач и здоровье. 2022. №2 (56) Special Issue. С. 348-349.
298. Текучева С.В., Оборотистов Н.Ю., Персин Л.С. Сравнительный анализ результатов антропометрии зубов, выполненной на гипсовых и цифровых 3D-моделях зубных рядов // Ортодонтия. 2015. № 4. С. 17-29.
299. Терехов М.С., Апресян С.В., Степанов А.Г., Кирюшин М.А. Качество жизни стоматологических пациентов с полным отсутствием зубов, протезированных с применением цифровых технологий // Российский стоматологический журнал. 2023. Т. 27, № 1. С. 51–62
300. Тимченко В.В. Планирование лечения пациентов с зубочелюстными аномалиями с преимущественной локализацией нарушений

в вертикальном направлении: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Санкт-Петербург, 2018. – 153 с.

301. Тихонов В.Э., Григорян А.А., Полковникова Л.Б., Гришин М.И. Некоторые аспекты эстетики в практике зубопротезирования // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. №4-4. С. 84-86.

302. Токаревич И. В. и др. Общая ортодонтия. – Минск: БГМУ, 2023. – 160 с.

303. Токаревич И.В. и др. Инновации в ортодонтии. – Минск: БГМУ, 2022. – 100 с.

304. Торохова В.О., Шкарин В.В., Дмитриенко Д.С. и др. Преимущества современных методов биометрического исследования гипсовых моделей челюстей // Современная наука и инновации. 2017. № 2. С. 222-228.

305. Трезубов В.Н., Фадеев Р.А., Черновол Е.М. Метод объективной оценки влияния прикуса на эстетику лица // Институт Стоматологии. 2002. №14. С. 14-15.

306. Уманская Ю.Н. Комплексная диагностика и реабилитация пациентов с дисфункцией височно-нижнечелюстного сустава, ассоциированной с дисплазией соединительной ткани: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Волгоград, 2014. – 160 с.

307. Умирзакова Н. А. и др. Эстетическая стоматология как феномен культуры // International Conference on Multidimensional Research and Innovative Technological Analyses. 2022. С. 133-137.

308. Успенская О.А., Плишкина А.А., Жданова М.Л. и др. Роль цифровой дентальной фотографии в практике врача-стоматолога терапевта // Здоровье и образование в XXI веке. 2019. №9. С. 5-11.

309. Фадеев Р.А., Кудрявцева О.А. Особенности диагностики и реабилитации пациентов с зубочелюстными аномалиями, осложненными

заболеваниями височно-нижнечелюстных суставов и жевательных мышц // Институт стоматологии. 2008. №4. С. 20-21.

310. Фадеев Р.А., Прозорова Н.В., Фадеева М.Р. и др. Альтернативный подход к лечению скелетных форм мезиального соотношения зубных рядов у пациентов с завершенным ростом лица // Институт стоматологии. 2018. № 81. С. 44-47.

311. Хаджаева П.Г. Эффективность диагностики и комплексного лечения пациентов с аномалиями окклюзии в сменном прикусе: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Ставрополь, 2022. – 140 с.

312. Хайрзаманова К.А. Оптимизация лечения травматических поражений слизистой оболочки рта при ортодонтическом лечении: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Уфа, 2019. – 157 с.

313. Хасасна М.М. Экспериментально-клиническая эффективность цифровых методов определения цвета зубов: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2022. – 161 с.

314. Хафизов Р.Г. Стоматологическая радиология / Р.Г. Хафизов, А.К. Житко, Д.А. Азизова, Ф.А. Хафизова, А.Р. Хаирутдинова. – Казань: Казан. Ун-т, 2015. – 64 с.

315. Хватова В. А. Гнатологические принципы в диагностике и лечении патологии зубочелюстно-лицевой системы. – М.: [б. и.], 2001. – 96 с.

316. Хватова В.А. Клиническая гнатология. – М.: Офтальмология, 2023. – 176 с.

317. Хворостенко Е.А. Ортодонтическое лечение пациентов с аномалиями зубных рядов с применением несъемных аппаратов и ортодонтических минивинтов: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2023. – 209 с.

318. Хвостенко Е.А. Ортодонтическое лечение пациентов с аномалиями зубных рядов с применением несъемных аппаратов и

ортодонтических минивинтов: автореф. дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Москва, 2023. – 26 с.

319. Хисматуллина З.Р., Чеботарев В.В., Закирова Ю.А., Яшкина А.А. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия в диагностике онкологической патологии: современные аспекты и перспективы применения // Креативная хирургия и онкология. 2021. №11(1). С. 76-84.

320. Хоранова Н.А., Фомина А.В. Медико-социальные аспекты специальной ортодонтической подготовки пациентов с зубочелюстными аномалиями при частичной вторичной адентии перед постоянным протезированием (краткий обзор литературы) // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2017. №2. С. 349-355.

321. Хорев О.Ю., Майборода Ю.Н. Оклюзионные интерференции и нейромышечная дисфункция // Кубанский научный медицинский вестник. 2017. Т. 24, № 6. С. 161-167.

322. Хорольский Е.В., Ломиашвили Л.М., Погадаев Д.В. и др. Анализ морфофункциональных параметров рельефа нижних моляров человека методом 3D сканирования //Институт Стоматологии. 2023. №4. С. 119-121.

323. Хорошилкина Ф. Я. Диагностика и функциональные методы профилактики и лечения зубочелюстно-лицевых аномалий; под ред. Э. А. Базикина. – М.: Литтерра, 2022. – 552 с.

324. Цветкова М.А. Ортодонтия и патология слизистой оболочки рта / М. А. Цветкова, Л. А. Аксамит. – М.: МЕДпресс-информ, 2023. – 96 с.

325. Чантырь И.В., Дробышева А.Ю., Дробышева Н.С. Вертикальная резцовая дизокклюзия: этиопатогенез, классификация, клинко-морфологические формы, принципы лечения (обзор литературы) // Уральский медицинский журнал. 2016. № 7(140). С. 44-54.

326. Чепуряева О. Сравнительная оценка электромиографов, применяемых в клинике, методом экспертных оценок // Russian Biomedical Research (Российские биомедицинские исследования). 2024. № 8(3). С. 31-35.

327. Черемных А.И., Русских И.С. Заболевания и повреждения ВНЧС у детей и подростков // Международный студенческий научный вестник. 2021. № 3. С. 22.
328. Черепанова А.А. Манашев Г.Г., Кан В.В. и др. Современные методы лучевой диагностики в ортодонтии // Сибирский медицинский журнал. 2010. Т.25. №3(2). С. 47-50.
329. Черненко С.В., Корчемная О.С., Корчемный В.М. и др. Сравнительный анализ ортодонтических элайнеров и брекет-систем // МвК. 2023. №1. С. 38-43.
330. Чуйкин С.В., Аверьянов С.В., Снеткова Т.В., Чуйкин О.С. Функциональные методы исследования в ортодонтии. – Уфа: БГР, 2011. – 71 с.
331. Чхиквадзе Т. В., Бекреев В. В., Роцин Е. М. и др. Коррекция внутренних нарушений височно-нижнечелюстного сустава с использованием окклюзионных шин, изготовленных с помощью CAD/CAM-технологий // Современные технологии в медицине. 2019. Т. 11, № 3. С. 111–117.
332. Чхиквадзе Т.В. Роцин Е.М., Бекреев В.В. Сравнительный анализ виртуальных и механических артикуляторов в функциональной диагностике // Вестник РУДН. Серия: Медицина. 2020. Т. 24. № 1. С. 38-51.
333. Чхиквадзе Т.В., Бекреев В.В., Роцин Е.М. и др. Коррекция внутренних нарушений височно-нижнечелюстного сустава с использованием окклюзионных шин, изготовленных с помощью CAD/CAM-технологий // Соврем. технол. мед. 2019. №3. С. 111-116.
334. Шабалина И.М. Оптимизация ортопедической стоматологической помощи больным при включенных дефектах зубных рядов на фоне сахарного диабета 2 типа: дисс. ... канд. мед. наук: 3.1.7. – Краснодар, 2021. – 199 с.
335. Шадрин М.В. Лазерный триангуляционный 3D метод и устройство для прототипирования и изготовления сложных изделий: автореф. дисс. ... канд. тех. наук: 01.04.01. – Рязань, 2020. – 19 с.

336. Шаймарданов Т.Н. Оптимизация остеointеграции при дентальной имплантации у пациентов с хроническим генерализованным пародонтитом: автореф. дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Уфа, 2018. – 23 с.
337. Шашурина С.В. Совершенствование методов хирургического лечения рецессий десны: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Тверь, 2017. – 281 с.
338. Шипика Д.В. Совершенствование диагностики и лечения заболеваний ВНЧС у пациентов с аномалиями прикуса: автореф. дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14, 14.01.13. – Москва, 2012 – 25 с.
339. Шитова Е.С., Малахова И.С., Лемешко В.И. Возможность использования миотонометрии для оценки мышечного утомления работников физического труда // Медицина труда и промышленная экология. 2020. № 60(11). С. 892-894.
340. Шишмарева А.С. Обоснование профилактического протезирования детей после ранней потери верхних временных резцов: автореф. дис. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Екатеринбург, 2018. – 24 с.
341. Шкарин В. В., Мансур Ю. П., Дмитриенко Т. Д. [и др.]. Рентгенологические методы исследования в практике врача-ортодонта. – Волгоград: Изд-во ВолГМУ, 2021. – 56 с.
342. Шкарин В.В., Дмитриенко Т.Д., Кочконян Т.С. и др. Анализ классических и современных методов биометрического исследования зубочелюстных дуг в периоде прикуса постоянных зубов (обзор литературы) // Вестник ВолГМУ. 2022. №1. С. 9-16.
343. Шувалова В.А., Ермолаева Л.А., Чибисова М.А. Преимущества применения фотопротокола в практике врача-стоматолога-терапевта // Институт Стоматологии. 2023. № 98. С. 54-55.
344. Шумилина В. А., Бородина В.А. Сравнительная оценка применения методов биометрического анализа гипсовых моделей челюстей // Современные методы диагностики, лечения, и профилактики

стоматологических заболеваний: к 25-летию общественной организации «Стоматологическая Ассоциация Ставропольского края», Ставрополь, 05–06 апреля 2018 года. – Ставрополь: Ставропольский государственный медицинский университет, 2018. – С. 168-170.

345. Щербич В.М. Клинико-морфологические параллели в скрининговой оценке костной ткани нижней челюсти при заболеваниях пародонта: автореф. дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14, 14.03.02. – Омск, 2010. – 21 с.

346. Юдин Д.К., Гетте С.А. Метод анализа параметров височно-нижнечелюстного сустава по данным магнитно-резонансной томографии // ВРР. 2022. №4-6. С. 52-57.

347. Юсупова Ю.И. Комплексная профилактика и лечение воспалительных заболеваний пародонта у пациентов, проходящих ортодонтическое лечение: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Москва, 2018. – 146 с.

348. Ягупова В.Т., Дмитриенко Т.Д., Дмитриенко Д.С., Ягулов П.П. Варианты биометрической диагностики аномалий зубных дуг со смещенным центром // Научное обозрение. Медицинские науки. 2023. № 5. С. 5-9

349. Ярадайкина М.Н. Обоснование применения нового метода геометрически-графической репродукции зубных дуг в клинике ортодонтии: дисс. ... канд. мед. наук: 14.01.14. – Волгоград, 2014. – 104 с.

350. Abad-Coronel C., Ruano Espinosa C., Ordóñez Palacios S. et al. Comparative Analysis between Conventional Acrylic, CAD/CAM Milled, and 3D CAD/CAM Printed Occlusal Splints // Materials (Basel). 2023 Sep 19. Vol. 16(18). P. 6269.

351. Abesi F., Maleki M., Zamani M. Diagnostic performance of artificial intelligence using cone-beam computed tomography imaging of the oral and maxillofacial region: A scoping review and meta-analysis // Imaging Sci Dent. 2023 Jun. Vol. 53(2). P. 101-108.

352. Aboshady H., Abouelezz A.M.A., Aboul Fotouh M.H., Elkordy S.A.M. Failure Rate of Orthodontic Mini-screw after Insertion using 3D Printed Guide versus Conventional Free Hand Placement Technique: Split Mouth Randomized Clinical Trial // Open Access Maced J Med Sci [Internet]. 2022 Jan. 6 [cited 2024 Jun. 30]. Vol. 10(D). P. 6-13.
353. Adobes Martin M., Lipani E., Bernes Martinez L. et al. Reliability of Tooth Width Measurements Delivered by the Clin-Check Pro 6.0 Software on Digital Casts: A Cross-Sectional Study // Int J Environ Res Public Health. 2022 Mar 17. Vol. 19(6). P. 3581.
354. Ahmed N., Halim M.S., Ab-Ghani Z., et al. The Analysis of Facio-Dental Proportions to Determine the Width of Maxillary Anterior Teeth: A Clinical Study // Journal of Clinical Medicine. 2022. Vol. 11(24). P. 7340a
355. Albagieh H., Alomran I., Binakresh A. et al. Occlusal splints-types and effectiveness in temporomandibular disorder management // Saudi Dent J. 2023 Jan. Vol. 35(1). P. 70-79.
356. Alfallaj H. Pre-prosthetic orthodontics. Saudi Dent J. 2020 Jan. Vol. 32(1). P. 7-14.
357. Al-hadad, S.A., ALyafrusee, E.S., Abdulqader A.A. et al. Comprehensive three-dimensional positional and morphological assessment of the temporomandibular joint in skeletal Class II patients with mandibular retrognathism in different vertical skeletal patterns // BMC Oral Health. 2022. Vol. 22. P. 149.
358. Alharkan HM. Integrating digital smile design into restorative Dentistry: A narrative review of the applications and benefits // Saudi Dent J. 2024 Apr. Vol. 36(4). P. 561-567.
359. AlHudaithi F.S., AlDuhayan N.A., AlJohani L.N. et al. Prevalence of Dental Anomalies Among Orthodontic Patients: A Retrospective Study in Saudi Arabia // Cureus. 2023 Dec 4. Vol. 15(12). P. e49893.

360. Aliev N. H. Clinical and functional methods of assessment and diagnosis of the pathological condition of the temporomandibular joint // New day in medicine. 2021. № 1. P. 375-380.

361. Alizad-Rahvar M., Safi Y., Kadkhodazadeh M. et al. Clinical efficacy of intraoral ultrasonography versus transgingival probing for measurement of gingival thickness in different gingival biotypes: a clinical trial // Head Face Med. 2024. Vol. 20. P. 23.

362. Al-Jasser R., Al-Subaie M., Al-Jasser N., Al-Rasheed A. Rotational relapse of anterior teeth following orthodontic treatment and circumferential supracrestal fiberotomy // Saudi Dent J. 2020 Sep. Vol. 32(6). P. 293-299.

363. Almaqrami B.S., Alhammadi M.S., Tang B. et al. Three-dimensional morphological and positional analysis of the temporomandibular joint in adults with posterior crossbite: A cross-sectional comparative study // Journal of Oral Rehabilitation. 2021. Vol. 48. N 6. P. 666-677.

364. Al-Mobeeriek A. Dentist-patient communication as perceived by patients in Riyadh, Saudi Arabia // Int. J. Occup. Med. Environ. Health. 2012. Vol. 25. P. 89-96.

365. Alsulaimani L, Alqarni H., Akel M., Khalifa F. The Orthodontics-Periodontics Challenges in Integrated Treatment: A Comprehensive Review. Cureus. 2023 May 14. Vol. 15(5). P. e38994.

366. Alves P.H.M., Alves T. C. L. P., Pegoraro T. A. et al. Measurement properties of gingival biotype evaluation methods // Clinical Implant Dentistry and Related Research. 2018. Vol. 20. № 3. P. 280-284.

367. Amid R., Mirakhori M., Safi Y. et al. Assessment of gingival biotype and facial hard/soft tissue dimensions in the maxillary anterior teeth region using cone beam computed tomography // Arch Oral Biol. 2017. Vol. 79. P. 1-6.

368. Angelone F., Ponsiglione A.M., Ricciardi C., Cesarelli G., et al. Diagnostic Applications of Intraoral Scanners: A Systematic Review. Journal of Imaging. 2023. Vol. 9(7). P. 134.

369. Apresyan S., Stepanov A., Borodina I. Designing of a custom device for investigating the masticatory and temporal muscles in patients experiencing tmj dysfunction // *Bulletin of Stomatology and Maxillofacial Surgery*. 2023. Vol. 19(3). P. 5-15.
370. Ateş G., Demirel M., Donmez M.B. et al. Effect of material and antagonist type on the wear of occlusal devices with different compositions fabricated by using conventional, additive, and subtractive manufacturing // *J Prosthet Dent*. 2024 Jun. Vol. 131(6). P. 1235.e1-1235.e8.
371. Ayidağa C., Kamiloğlu B. Effects of Variable Composite Attachment Shapes in Controlling Upper Molar Distalization with Aligners: A Nonlinear Finite Element Study // *J Healthc Eng*. 2021 Aug 20. Vol. 2021. P. 5557483.
372. Baan F., de Waard O., Bruggink R. et al. Virtual setup in orthodontics: planning and evaluation // *Clin Oral Investig*. 2020 Jul. Vol. 24(7). P. 2385-2393.
373. Balasuriya P., Doyle E. The use of dental CT for age profiling // *Journal of Forensic Radiology and Imaging*. 2019. Vol. 17. P. 5-11.
374. Baldini B., Cavagnetto D., Baselli G. et al. Cephalometric measurements performed on CBCT and reconstructed lateral cephalograms: a cross-sectional study providing a quantitative approach of differences and bias // *BMC Oral Health*. 2022. Vol. 22. P. 98.
375. Balijs N.D., Aurer B., Meštrović S., Varga M.L. Prevalence of Dental Anomalies in Orthodontic Patients // *Acta Stomatol Croat* 2022. Vol. 56(1). P. 61-68.
376. Baneshi M. Effectiveness of clear orthodontic aligners in correcting malocclusion- systematic review. – School of Medical Sciences, Division of Dentistry, 2024. – 96 p.
377. Barreto M.S., Faber J., Vogel C.J., Araujo T.M. Reliability of digital orthodontic setups // *The Angle Orthodontist*. 2016. Vol. 86. № 2. P. 255-259.
378. Baxi S., Bhatia V., Tripathi A. et al. Temporary Anchorage Devices. *Cureus*. 2023 Sep 1. Vol. 15(9). P. e44514.

379. Beri, A., Pisulkar, S.K., Bagde, A.D. et al. Evaluation of accuracy of photogrammetry with 3D scanning and conventional impression method for craniomaxillofacial defects using a software analysis // *Trials*. 2022. Vol. 23. P. 1048.
380. Best A.D., Shroff B., Carrico C.K., Lindauer S.J. Treatment management between orthodontists and general practitioners performing clear aligner therapy // *Angle Orthod*. 2017. №87. P. 432-439.
381. Birnbaum N.S., Aaronson H.B., Stevens C., Cohen B. 3D Digital Scanners: A High-Tech Approach to More Accurate Dental Impressions // *Inside Dentistry*; 2009. Vol. 5. P. 70-74.
382. Bonnet G., Batisse C., Bessadet M., et al. A new digital denture procedure: a first practitioners appraisal // *BMC Oral Health*. 2017. Vol. 17(1).
383. Borda A. F., Garfinkle J. S., Covell D. A. et al. Outcome assessment of orthodontic clear aligner vs fixed appliance treatment in a teenage population with mild malocclusions // *Angle Orthodontist*. 2020. Vol. 90. № 4. P. 485- 490.
384. Brawek P. et al. The clinical accuracy of single crowns exclusively fabricated by digital workflow--the comparison of two systems // *Clinical oral investigations*. 2013. V. 17. № 9. P. 2119-2125.
385. Brenes C., Jurgutis L., Babb C.S. Digital face-bow transfer technique using the dentofacial analyzer for dental esthetics and 2-D, 3-D smile design: A clinical report. *J. Oral Science Rehabilitation*. 2018 Jun. Vol. 4(2). P. 22-30.
386. Bucci R., Rongo R., Levatè C., Michelotti A. et al. Thickness of orthodontic clear aligners after thermoforming and after 10 days of intraoral exposure: a prospective clinical study // *Prog Orthod*. 2019. Vol. 20. P. 1-8.
387. Buduru S., Balhuc S., Ciumasu A. et al. Temporomandibular dysfunction diagnosis by means of computerized axiography // *Med Pharm Rep*. 2020 Oct. Vol. 93(4). P. 416-421.
388. Burgner J., Simpson A. L., Fitzpatrick J. M., et al. A study on the theoretical and practical accuracy of conoscopic holography-based surface

measurements: toward image registration in minimally invasive surgery // International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. 2013. Vol. 9(2). P. 190-203.

389. Bynum J.H., Mirelez J.A. 3D facial scanning: dual-arch fixed prostheses from diagnosis to delivery. *Compend Contin Educ Dent*. 2021. Vol. 42(5). P. 230-5.

390. Camardella L.T. и др. Virtual setup: application in orthodontic practice // *J. Orofac. Orthop*. 2016. Vol. 77(6). P. 409-19.

391. Camardella L.T., Breuning H., Vilella O.V. Are there differences between comparison methods used to evaluate the accuracy and reliability of digital models? // *Dental Press J Orthod*. 2017 Feb. Vol. 22(1). P. 65-74.

392. Can E., Panayi N., Polychronis G. et al. In-house 3D-printed aligners: effect of in vivo ageing on mechanical properties. *Eur J Orthod*. 2022. Vol. 44. P. 51-5.

393. Carlier R., Quijano-Roy, S. Muscle Magnetic Resonance Imaging: A New Diagnostic Tool with Promising Avenues in Therapeutic Trials // *Neuropediatrics*. 2014. Vol. 45(05). P. 273-274.

394. Carossa M., Cavagnetto D., Ceruti P. et al. Individual mandibular movement registration and reproduction using an optoelectronic jaw movement analyzer and a dedicated robot: a dental technique // *BMC Oral Health*. 2020 Oct 7. Vol. 20(1). P. 271.

395. Carvajal-Flórez A. Barbosa-Lis D. M., Zapata-Noreña O. A. et al. Orthodontic treatment outcomes obtained by application of a finishing protocol // *Dental Press Journal of Orthodontics*. 2016. Vol. 21. № 2. P. 88-94.

396. Cascone, P., Gennaro P., Gabriele G. et al. Temporomandibular Synovial chondromatosis with numerous nodules // *J. Craniofac.Surg*, 2014. Vol.25. P. 1114-1115.

397. Cassetta M, Altieri F, Pandolfi S, Giansanti M. The combined use of computer-guided, minimally invasive, flapless corticotomy and clear aligners as a

novel approach to moderate crowding: A case report // Korean J Orthod. 2017. №47. P. 130-141.

398. Castroflorio, T., Sedran, A., Parrini, S. et al. Predictability of orthodontic tooth movement with aligners: effect of treatment design // Prog Orthod. 2023. Vol. 24. P. 2.

399. Cervino G. et al. Dental restorative digital workflow: digital smile design from aesthetic to function // Dentistry journal. 2019. Vol. 7. No. 2. P. 30.

400. Chandra S., Agarwal V., Singh V.K. et al. Evaluation of different aesthetic indices for planning orthodontic treatment // Bioinformation. 2023 Dec 31. Vol. 19(13). P. 1394-1398.

401. Cheng J. H. C., Luechapanichkul M. J., Lee T. Y. H. The relationship between dentofacial morphology and smile characteristics in lateral and oblique views // Journal of Dental Sciences. 2021. Vol. 16. No. 1. P. 37-44.

402. Chisnoiu A.M., Staicu A.C., Kui A. et al. Smile Design and Treatment Planning-Conventional versus Digital-A Pilot Study. J Pers Med. 2023 Jun 21. Vol. 13(7). P. 1028.

403. Choi Y., Kim Y.I., Kim S.S. et al. Immediate effects of mandibular posterior displacement on the pharyngeal airway space: A preliminary study // Korean J Orthod. 2020. Vol. 50, № 2. P. 129-135.

404. Churrua K., Pomare C., Ellis L.A. et al. Patient-reported outcome measures (PROMs): A review of generic and condition-specific measures and a discussion of trends and issues. Health Expect. 2021 Aug. Vol. 24(4). P. 1015-1024.

405. Cons N.C., Jenny J., Kohout F.J. et al. Utility of the dental aesthetic index in industrialized and developing countries. J Public Health Dent // 1989 Summer. Vol. 49(3). P. 163-6.

406. Crout D.K. Anatomy of an occlusal splint // Gen. Dent. 2017. Mar.-Apr., Vol. 65(2). P. 52-59.

407. Dalaie K., Fatemi S.M., Ghaffari S. Dynamic mechanical and thermal properties of clear aligners after thermoforming and aging // *Prog Orthod*. 2021. Vol. 22. P. 15.
408. Daroğlu F., Yetkiner E. Cone Beam Computed Tomography in Orthodontics // *Turk J Orthod*. 2016 Mar. 29(1). P. 16-21.
409. Das G., Ahmed A.R., Suleman G. et al. Comparative Evaluation of Dentogingival Tissue Using Transgingival Probing and Cone-Beam Computed Tomography // *Medicina*. 2022. Vol. 58(9). P. 1312.
410. De Brito G.M., Simões D., Flores P.S., Machado A. W. An Effective Approach to Correcting Anterior Crossbite in a Class III Patient // *Journal of clinical orthodontics*. 2020. Vol. 54. № 11. P. 705-710.
411. De Vos W., Casselman J., Swennen G.R. Cone-beam computerized tomography (CBCT) imaging of the oral and maxillofacial region: A systematic review of the literature // *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2009. №38. P. 609-625.
412. Diab, Kh. M., Vasilyev A. Yu., Potrakhov N. N. et al. Microfocus X-ray at the surgical stage of cochlear implantation: experimental study // *Modern Science*. 2016. № 11. C. 76-81.
413. Diaconu A., Holte M.B., Cattaneo P.M., Pinholt E.M. A semi-automatic approach for longitudinal 3D upper airway analysis using voxel-based registration // *Dentomaxillofac Radiol*. 2022. Vol. 51. №3 P. 20210253.
414. Dmitrienko S.V., Davydov B.N., Domenyuk D.A., Ivanyuta S.O. Morphometric analysis of relationships of basic dimensions of dental arches taking into account individual gnathic types // *Medical alphabet*. 2019. Vol. 1(5). P. 37-44.
415. Doshi K.N., Sathe S., Dubey S.A., Bhoyar A., Dhamande M, Jaiswal T. A. Comprehensive Review on Virtual Articulators. *Cureus*. 2024 Jan 19. Vol. 16(1). P. e52554.
416. Downarowicz P. et al. Dynamic changes in morphometric analysis in patients following Class III bimaxillary surgery // *Adv Clin Exp Med*. 2012. Vol. 21. № 1. P. 93-97.

417. Drenski Balijski N., Aurer B., Meštrović S., Lapter Varga M. Prevalence of Dental Anomalies in Orthodontic Patients // *Acta Stomatol Croat.* 2022 Mar. Vol. 56(1). P. 61-68.
418. Dzhalalova M.V., Stepanov A.G., Apresyan S.V., Oganyan A.I. Numerical investigation of the stress-strain state of zirconium dioxide pin structures manufactured using CAD/CAM technologies. *Russian Journal of Biomechanics*, 2023, no. 1, pp. 16-23.
419. Eid H., Elhiny O.A. Evaluation of an open access generic 3D software for Orthodontic diagnosis and treatment planning // *Brazilian Journal of Oral Sciences*. 2021. Vol. 21(00). P. e227903
420. Eliades T, Papageorgiou SN, Ireland AJ. The use of attachments in aligner treatment: Analyzing the "innovation" of expanding the use of acid etching-mediated bonding of composites to enamel and its consequences // *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2020 Aug. Vol. 158(2). P. 166-174.
421. Elmoutawakkil D., Hacib N. Digital Workflow for Homemade Aligner // *IntechOpen*. 2022. doi: 10.5772/intechopen.100347.
422. Faccioni P., Luciano U., Brun V. et al. An overview of photometric analysis to evaluate aesthetics in orthodontic patients. *Journal of Biological Regulators and Homeostatic Agents*. 2021. Vol. 35(5(S1)). P. 17-22.
423. Fageeh H.N., Meshni A.A., Jamal H.A. et al. The accuracy and reliability of digital measurements of gingival recession versus conventional methods // *BMC Oral Health*. 2019 Jul 16. Vol. 19(1). P. 154.
424. Fan S., Cai B., Fang Z. Y. et al. Mandibular manipulation technique followed by exercise therapy and occlusal splint for treatment of acute anterior TMJ disk displacement without reduction // *Shanghai Kou Qiang Yi Xue*. 2016. Oct., Vol. 25(5). P. 570-573
425. Farook T.H., Haq T.M., Ramees L., Dudley J. Deep learning and predictive modelling for generating normalised muscle function parameters from

signal images of mandibular electromyography // *Med Biol Eng Comput.* 2024 Jun. Vol. 62(6). P. 1763-1779.

426. Fayad R., Kassis A., Akl R. et al. Correlation between fusion of sphenoccipital synchondrosis and cervical vertebral maturation: A CBCT and cephalometric assessment // *Int Orthod.* 2020. Vol. 18, №2. P. 749-757.

427. Felter M, Lenza M.M.O., Lenza M.G., et al. Comparative study of the usability of two software programs for visualization and analysis of digital orthodontic models // *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects.* 2018 Summer. Vol. 12(3). P. 213-220.

428. Fernández-González F.J. et al. Efficacy of selective grinding guided by an occlusal splint in management of myofascial pain: A prospective clinical trial // *The open dentistry journal.* 2017. T. 11. P. 301.

429. Gaboutchian A.V., Knyaz V.A., Korost D.V. New Approach to Dental Morphometric Research Based on 3D Imaging Techniques // *J Imaging.* 2021 Sep 12. Vol. 7(9). P. 184.

430. Garcia P. P. et al. Digital smile design and mock-up technique for esthetic treatment planning with porcelain laminate veneers // *Journal of conservative dentistry: JCD.* 2018. Vol. 21. №. 4. P. 455.

431. Garstka A.A., Kozowska L., Kijak K., Brzózka M. et al. Accurate Diagnosis and Treatment of Painful Temporomandibular Disorders: A Literature Review Supplemented by Own Clinical Experience // *Pain Res Manag.* 2023 Jan 31. Vol. 2023:1002235.

432. Gerhardt M.D.N., Fontenele R.C., Leite A.F., et al. Automated detection and labelling of teeth and small edentulous regions on cone-beam computed tomography using convolutional neural networks // *J Dent.* 2022 Jul. Vol. 122. P. 104139.

433. Gianluigi F. Axiography and MRI in the diagnosis of temporomandibular joint pathology // *J Stomat Occ Med.* 2009. Vol. 2. P. 50-51.

434. Gibreel M., Perea-Lowery L., Vallittu P.K., Lassila L. Characterization of occlusal splint materials: CAD-CAM versus conventional resins. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2021 Dec. Vol. 124. P. 104813.
435. Gilmour I., Ray N. Locating Cephalometric X-Ray Landmarks with Foveated Pyramid Attention // *Proceedings of Machine Learning Research.* 2020. Vol. 121. P. 262-274.
436. Giudice A. Lo, Nucera R., Ronsivalle V. et al. Enhancing the diagnosis of maxillary transverse discrepancy through 3-D technology and surface-to-surface superimposition. Description of the digital workflow with a documented case report // *European Journal of Pediatric Dentistry.* 2020. Vol. 21. № 2. P. 213-218.
437. Goldstein G., Goodacre C. Selecting a Virtual Articulator: An Analysis of the Factors Available with Mechanical Articulators and their Potential Need for Inclusion with Virtual Articulators // *J Prosthodont.* 2023 Jan. Vol. 32(1). P. 10-17.
438. Golkhani B., Weber A., Keilig L. et al. Variation of the modulus of elasticity of aligner foil sheet materials due to thermoforming // *J Orofac Orthop Fortschritte Kieferorthopädie.* 2022. Vol. 83. P. 233-43.
439. Goodrich G.W., Lazenby J.M. Elements of patient satisfaction: An integrative review. *Nurs Open.* 2023 Mar. Vol. 10(3). Vol. 1258-1269.
440. Goyal L. et al. *Dental Office Layout and Design // A Guide to Hospital Administration and Planning.* – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – P. 79-93.
441. Graf S., Vasudavan S., Wilmes B. CAD-CAM design and 3-dimensional printing of mini-implant retained orthodontic appliances // *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2018 Dec. Vol. 154(6). P. 877-882.
442. Greene C.S., Manfredini D. Treating temporomandibular disorders in the 21st century: can we finally eliminate the «Third Pathway» // *J. Oral Facial Pain Headache.* 2020. Vol. 34. N 3. P. 206-216.

443. Hack G, Liberman L., Vach K., Tchorz J.P. et al. Computerized optical impression making of edentulous jaws - An in vivo feasibility study // J Prosthodont Res. 2020 Oct. Vol. 64(4). P. 444-453.
444. Hadadpour S., Noruzian M., Abdi A. H. et al. Can 3D imaging and digital software increase the ability to predict dental arch form after orthodontic treatment? // Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop. 2019. Vol.156(6). P. 870- 877.
445. Hammam K.I., Nassef E., AL Dawlitaly M. Comparing Program Compatibility for Dental Operators between Different In-office Clear Aligners Software. Future Dental Journal. 2024. Vol. 9(2). P. 111-115.
446. Han W., Li Y., Zhang Y., et al. Design and fabrication of complete dentures using CAD/CAM technology // Medicine. 2017. Vol. 96(1). e5435.
447. Hans M.G., Palomo J.M., Valiathan M. History of imaging in orthodontics from Broadbent to cone-beam computed tomography // Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2015. №148. P. 914–921.
448. Hegele J., Seitz L., Claussen C., Baumert U. et al. Clinical effects with customized brackets and CAD/CAM technology: a prospective controlled study // Prog Orthod. 2021 Dec 6. Vol. 22(1). P. 40
449. Igbemi M.A., Oghenemavwe E.L., Ugwa O.Ch. // Eur. J. Biomed. Pharm. Sci. 2019. V. 6. № 6. P. 9; Eboh D.E.O. // Anat. Cell Biol. 2019. V. 52. № 3. P. 1.
450. Ihssen B.A., Kerberger R., Rauch N. et al. Impact of dental model height on thermoformed PET-G aligner thickness – an in vitro micro-CT study // Appl Sci. 2021. Vol. 21(11). P. 6674.
451. Ikeda K. A reference line on temporomandibular joint MRI // J Prosthodont. 2013. Vol. 22:603-607.
452. Ikeda K., Kawamura A. Disc displacement and changes in condylar position // Dentomaxillofac Radiol. 2013. Vol. 42. P. 84227642.

453. Im J., Cha J. Y., Lee K. J. et al. Comparison of virtual and manual tooth setups with digital and plaster models in extraction cases / J. Im, // American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. 2014. Vol. 145. № 4. P. 434-442.
454. Im J., Kang S.H., Lee J.Y. et al. Surgery-first approach using a three-dimensional virtual setup and surgical simulation for skeletal Class III correction. Korean J Orthod. 2014 Nov. Vol. 44(6). P. 330-41.
455. Inchingolo A.M. et al. Tooth Complications after Orthodontic Miniscrews Insertion. Int J Environ Res Public Health. 2023 Jan 14. Vol. 20(2). P. 1562.
456. Jafri Z. et al. Digital Smile Design-An innovative tool in aesthetic dentistry //Journal of oral biology and craniofacial research. 2020. Vol. 10. No. 2. P. 194-198
457. Jefferson Y. Facial esthetics--presentation of an ideal face // J Gen Orthod. 1993 Mar. Vol. 4(1). P. 18-23.
458. Jie Z. et al. Uprighting a mesially tilted mandibular left second molar with anchorage from a dental implant // J Prosthet Dent. 2020 Jan. Vol. 123(1). P. 50-53.
459. Jindal P., Juneja M., Bajaj D. et al. Effects of post-curing conditions on mechanical properties of 3D printed clear dental aligners // Rapid Prototyp J. 2020. Vol. 2. P. 1337-44.
460. Joda T., Brägger U., Gallucci G. Systematic literature review of digital three-dimensional superimposition techniques to create virtual dental patients // Int J Oral Maxillofac Implants. 2015. Vol. 30(2). P. 330-7.
461. Kabbur K.J. Hemanth M., Patil G.S. et al. An esthetic treatment outcome of orthognathic surgery and dentofacial orthopedics in class II treatment: a cephalometric study // J Contemp Dent Pract. 2012. Vol. 13. P. 602-606.
462. Ka-lun Li T. Computed tomography in dentistry // Dental Bulletin. 2008. Vol. 13. P. 4-6.

463. Kardach H., Szponar-Żurowska A., Biedziak B. A Comparison of Teeth Measurements on Plaster and Digital Models // J Clin Med. 2023 Jan 25. Vol. 12(3). P. 943.
464. Kasparova M., Grafova L., Dvorak P. et al. Possibility of reconstruction of dental plaster cast from 3D digital study models // BioMed Eng OnLine. 2013. Vol. 12. P. 49.
465. Kau C. H., Christou T., Sharma S. Contemporary smile design: an orthodontic perspective // Dental Clinics. 2022. Vol. 66. No. 3. P. 459-475.
466. Keilig L., Fittgen A., Schneider H. et al. Accuracy of Digital Orthodontic Treatment Planning: Assessing Aligner-Directed Tooth Movements and Exploring Inherent Intramaxillary Side Effects // Journal of Clinical Medicine. 2024. Vol. 13(8). P. 2298.
467. Khairy S.A. Three-Dimensional scanning in Orthodontics. – BDS, MSc Orthodontics, PhD (Glasg) UK., 2023. – 48 p.
468. Kim J. et al. Accuracy and precision of polyurethane dental arch models fabricated using a three-dimensional subtractive rapid prototyping method with an intraoral scanning technique // Korean J Orthod. 2014. Vol. 44. №2. P. 69-76.
469. Kim M. Accuracy of an intraoral digital impression using parallel confocal imaging // J Dent Res. 2012. Vol 91. P. 995.
470. Kim T., Cho Y., Kim D. et al. Tooth Segmentation of 3D Scan Data Using Generative Adversarial Networks // Applied Sciences 2020, Vol. 10, Page 490. 2020. Vol. 10. № 2. P. 490.
471. Kinzinger G., Frye L., Diedrich P. Class II treatment in adults: comparing camouflage orthodontics, dentofacial orthopedics and orthognathic surgery – a cephalometric study to evaluate various therapeutic effects // J Orofac Orthop. 2009. Vol. 70. P. 63-91.
472. Kissel P., Mah J.K., Bumann A. Modern 3D cephalometry in pediatric orthodontics-downsizing the FOV and development of a new 3D cephalometric

analysis within a minimized large FOV for dose reduction // Clin Oral Investig. 2021. Vol.25. №7. P.4651-4670.

473. Ko H.C., Liu W., Hou D. et al. Recommendations for clear aligner therapy using digital or plaster study casts // Prog Orthod. 2018. Vol. 19. P. 22.

474. Kocasarac H.D., Angelopoulos C. Ultrasound in dentistry: toward a future of radiationfree imaging // Dental Clinics. 2018. № 3. P. 481-489.

475. Krenn V. A., Fornai C., Wurm L. et al. Variation of 3D outer and inner crown morphology in modern human mandibular premolars // The American Journal of Physical Anthropology. 2019. Vol. 169, № 4. P. 646-663.

476. Kusaibati A.M., Sultan K., Hajeer M.Y. et al. Adult patient expectations and satisfaction: Can they be influenced by viewing the three-dimensional predicted outcome before fixed orthodontic treatment of dental crowding? J World Fed Orthod. 2023 Dec. Vol. 12(6). P. 269-279.

477. Laganà G., Venza N., Borzabadi-Farahani A. et al. Dental anomalies: prevalence and associations between them in a large sample of non-orthodontic subjects, a cross-sectional study // BMC Oral Health 2017. Vol. 17(1). P. 62.

478. Lagravère M.O., Ling J., Woo C.P. et al. Transverse, vertical, and anterior-posterior changes between toothanchored versus Dresden bone-anchored rapid maxillary expansion 6 months post-expansion: a CBCT randomized controlled clinical trial // International Orthodontics. 2020. №18. P. 308-316.

479. Lamprecht R., Struppek J., Heydecke G., Reissmann D.R. Patients' criteria for choosing a dentist: Comparison between a university-based setting and private dental practices // J. Oral Rehabil. 2020. Vol. 47. P. 1023-1030.

480. Lee C.H. Hsu W.C., Ko J.Y. et al. Adenotonsillectomy for the Treatment of Obstructive Sleep Apnea in Children with Prader-Willi Syndrome: A Meta-analysis // Otolaryngol Head Neck Surg. 2020. Vol. 162. №2. P. 168-176.

481. Lee J. H., Lee N. K., Zou B. et al. Reliability of Artificial Intelligence-Based Cone Beam Computed Tomography Integration with Digital Dental Images // J. Vis. Exp. 2024. Vol. 204. P. e66014.

482. Lee J.D., Nguyen O., Lin Y-C., et al. Facial scanners in dentistry: an overview. *Prosthesis*. 2022. Vol. 4(4). P. 664-678.
483. Lee R.M. Comparison of two intraoral scanners based on three-dimensional surface analysis // *Progress in Orthodontics*. 2018. Vol. 19. P. 2-8.
484. Lee S., Hong S.-J., Paek J., et al. Comparing accuracy of denture bases fabricated by injection molding, CAD/CAM milling, and rapid prototyping method // *The Journal of Advanced Prosthodontics*. 2019. Vol. 11(1). P. 55.
485. Lee S.C., Hwang H.S., Lee K.C. Accuracy of deep learning-based integrated tooth models by merging intraoral scans and CBCT scans for 3D evaluation of root position during orthodontic treatment // *Prog Orthod*. 2022 May 9. Vol. 23(1). P. 15.
486. Lee S.Y., Kim H., Kim H.J. et al. Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners. *Sci Rep*. 2022. Vol. 12. P. 6246.
487. Lepcha P. T. et al. Smile Designing: The Inside Story // *International Journal*. 2022. Vol. 5. №. 3. P. 558.
488. Lepilin A.V., Dmitrienko S., Domenyuk D. et al. Dependence of Stress Strain of Dental Hard Tissues and Periodont on Horizontal Deformation Degree // *Archiv Euromedica*. 2019. Vol. 9(1). P. 173-194.
489. Li C., Chung C.H. A Simple Technique Using a Modified Nance Appliance as Anchorage for Maxillary Molar Distalization – Two Case Reports. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(2). P. 768.
490. Li W., Lu Y., Zheng K., et al. Structured Landmark Detection via Topology-Adapting Deep Graph Learning // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2020. Vol. 12354 LNCS. P. 266-28.
491. Liang Y.M., Rutchakitprakarn L., Kuang S.H., Wu T.Y. Comparing the reliability and accuracy of clinical measurements using plaster model and the digital

model system based on crowding severity // J Chin Med Assoc. 2018 Sep. Vol. 81(9). P. 842-847.

492. Lim H.C., Lee J., Kang D.Y. et al. Digital Assessment of Gingival Dimensions of Healthy Periodontium // J Clin Med. 2021 Apr 7. Vol. 10(8). P. 1550.

493. Lin H., Pan Y., Wei X. Et al. Comparison of the performance of various virtual articulator mounting procedures: a self-controlled clinical study. Clin Oral Investig. 2023 Jul. Vol. 27(7). P. 4017-4028.

494. Little P., Everitt H., Williamson I. et al. Observational study of effect of patient centredness and positive approach on outcomes of general practice consultations // BMJ. 2001. Vol. 323. P. 908-911.

495. Liu J., Zhang C., Shan Z. Application of Artificial Intelligence in Orthodontics: Current State and Future Perspectives. Healthcare. 2023. Vol. 11(20). P. 2760.

496. Liu X., Cheng Y., Qin W. et al. Effects of upper-molar distalization using clear aligners in combination with Class II elastics: a three-dimensional finite element analysis. BMC Oral Health. 2022 Dec 1. Vol. 22(1). P. 546.

497. Lo Giudice A., Nucera R., Ronsivalle V. et al. Enhancing the diagnosis of maxillary transverse discrepancy through 3-D technology and surface-to-surface superimposition. Description of the digital workflow with a documented case report // European Journal of Pediatric Dentistry. 2020. Vol. 21. No 2. P. 213-218.

498. Lo Russo L., Salamini A. Removable complete digital dentures: A workflow that integrates open technologies // The Journal of Prosthetic Dentistry. 2018. Vol. 119(5). P. 727-732.

499. Lobb W.K., Ismail A.I., Andrews C.L., Spracklin T.E. Evaluation of orthodontic treatment using the Dental Aesthetic Index // Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1994 Jul. Vol. 106(1). P. 70-5.

500. Lombardo L., Occhiuto G., Paoletto E. et al. Class II treatment by palatal miniscrew-system appliance: A case report // Angle Orthod. 2020 Mar. Vol. 90(2). P. 305-313.

501. Londono J., Ghasemi S., Hussain Shah A. et al. Evaluation of deep learning and convolutional neural network algorithms accuracy for detecting and predicting anatomical landmarks on 2D lateral cephalometric images: A systematic review and meta-analysis // *Saudi Dent J.* 2023 Jul. Vol. 35(5). P. 487-497.
502. Longhi M.T. de M., Silva R.U. de O., Almeida S.C.S. et al. Relationship between permanent upper anterior teeth and anthropometric facial measures in different populations: a narrative review // *Braz. J. Oral Sci.* [Internet]. 2024 May 2 [cited 2024 Jun. 16]. Vol. 23(00). P. e248788.
503. Losenická J., Gajdoš O., Kamenský V. Cost-utility analysis of an implant treatment in dentistry. *BMC Oral Health.* 2021 Sep 6. Vol. 21(1). P. 433.
504. Luchian I., Surlari Z., Goriuc A. et al. The Influence of Orthodontic Treatment of Periodontal Health between Challenge and Synergy: A Narrative Review // *Dentistry Journal.* 2024. Vol. 12(4). P. 112.
505. Lux L.H., Thompson G.A., Waliszewski K.J. Comparison of the Kois Dento-Facial Analyzer System with an earbow for mounting a maxillary cast // *J Prosthet Dent.* 2015 Sep. Vol. 114(3). P. 432-9.
506. Lv, L., He, W., Ye, H. et al. Interdisciplinary 3D digital treatment simulation before complex esthetic rehabilitation of orthodontic, orthognathic and prosthetic treatment: workflow establishment and primary evaluation // *BMC Oral Health.* 2022. Vol. 22. P. 34.
507. Madanshetty P., Guttal S.S., Meshramkar R. et al. Addition Silicone Impressions in Fixed Prosthodontics: Clinical Standpoints // *Cureus.* 2023 Aug 23. Vol. 15(8). P. e44014
508. Mangano F., Gandolfi A., Luongo G. et al. Intraoral scanners in dentistry: a review of the current literature. *BMC Oral Health.* 2017. Vol. 17. P. 149.
509. Maranini B., Ciancio G., Mandrioli S., Galiè M., Govoni M. The Role of Ultrasound in Temporomandibular Joint Disorders: An Update and Future Perspectives // *Front Med (Lausanne).* 2022 Jun 20. Vol. 9. P. 926573.

510. McCarty M.C., Chen S.J., English J.D., Kasper F. Effect of print orientation and duration of ultraviolet curing on the dimensional accuracy of a 3-dimensionally printed orthodontic clear aligner design // *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2020. Vol. 158. P. 889-97.
511. Mendes Ribeiro S.M., Aragón M.L.S.C., Espinosa D.D.S.G. et al. Orthodontic aligners: between passion and science. *Dental Press J Orthod*. 2024 Jan 5;28(6). P. e23spe6
512. Mester A., Onisor F., Mesaros A.S. Periodontal Health in Patients with Self-Ligating Brackets: A Systematic Review of Clinical Studies. *J Clin Med*. 2022 May 4. Vol. 11(9). P. 2570.
513. Mokrenko M.E., Guseynov N.A., Alhaffar J. et al. Review of online X-ray diagnostic services based on artificial neural networks in dentistry. *Medical Visualization*. 2022. Vol. 26(3). P. 114-122.
514. Moncada G. Cortes D., Millas R., Marholz C. Relationship between disk position and degenerative bone changes in temporomandibular joints of young subjects with TMD. An MRI study / // *J Clin Pediatr Dent*. 2014. Vol. 38. P. 269-276.
515. Moskovets O.N., Nikolaev D.V., Smirnov A.V. Evaluation of the periodontal tissue hydration level via bioimpedance spectrometry // *IFMBE Proceedings*, 2007. Vol. 17. P. 142-145.
516. Moskovets O.O., Slabkovskaya A.B., Abramova M.Y. Periotestometry and tissue hydration. How are these indicators related? // *Prensa Medica Argentina*. 2019. № 105 (9). P. 571-575
517. Mundhada V.V., Jadhav V.V., Reche A. A Review on Orthodontic Brackets and Their Application in Clinical Orthodontics. *Cureus*. 2023 Oct 7. Vol. 15(10). P. e46615.
518. Nakano H., Kato R., Kakami C. et al. Development of biocompatible resins for 3D printing of direct aligners // *J Photopolym Sci Technol*. 2019. Vol. 32. P. 209-16.

519. Narang D. Ultrasound in dentistry // International Journal of Dental Research. 2022. № 4. P. 1.
520. Natsubori, R., Fukazawa, S., Chiba, T. et al. In vitro comparative analysis of scanning accuracy of intraoral and laboratory scanners in measuring the distance between multiple implants // Int J Implant Dent 8. 2022. Vol. 18.
521. New Method for Analysis of the Temporomandibular Joint Using Cone Beam Computed Tomography / S. Iwaszenko, J. Munk, S. Baron et al. // Sensors. 2021. Vol. 21. №9.
522. Nocar A., Procházka A., Kloubcová M. et al. Three-Year Prospective Study Comparing Stereolithography Printed Models to Classical Impression and Plaster Cast Models in Orthodontic Therapy: A 3D Objectification Approach // Appl. Sci. 2023. Vol. 13. P. 7542.
523. Okeson J. P. Management of Temporomandibular Disorders and Occlusion. – 8th ed. – Elsevier, 2019. – 512 p.
524. Okičić N., Milosavljevic M., Jovanovic M., Božović Đ., Erić J. Combined Orthodontic and Prosthetic Treatment of a Patient with Angle Class II Division 1 Malocclusion: A Case Report // Experimental and Applied Biomedical Research (EABR). 2023. 10.2478/eabr-2023-0007.
525. Pahuja N., Doneria D., Mathur S. Comparative Evaluation of Accuracy of Intraoral Scanners vs Conventional Method in Establishing Dental Measurements in Mixed Dentition // World J Dent 2023. Vol. 14 (5). P. 419-424.
526. Palazzo G., Ronsivalle V., Oteri G. et al. Comparison between Additive and Subtractive CAD-CAM Technique to Produce Orthognathic Surgical Splints: A Personalized Approach // Journal of Personalized Medicine. 2020. Vol. 10(4). P. 273.
527. Panayi N.S. et al. Digital orthodontics: Present and future // NARRATIVE LITERATURE REVIEW. 2023. Vol. 4. Iss. 1. P. 14-25.
528. Papapanou P.N., Sanz M., Buduneli N. et al. Periodontitis: Consensus report of workgroup 2 of the 2017 World Workshop on the Classification of

Periodontal and Peri-Implant Diseases and Conditions // J. Periodontol. 2018. № 89 (1). P. 173–182.

529. Park G.H., Son K., Lee K.B. Feasibility of using an intraoral scanner for a complete-arch digital scan. J Prosthet Dent. 2019. Vol. 121. P. 803-10.

530. Patzelt S.B., Vonau S., Stampf S, Att W. Assessing the feasibility and accuracy of digitizing edentulous jaws. J Am Dent Assoc 2013. Vol. 144(8). P. 914-20.

531. Pellitteri F., Albertini P., Vogrig A. et al. Comparative analysis of intraoral scanners accuracy using 3D software: an in vivo study // Prog Orthod. 2022. Vol. 23. P. 21.

532. Persin L. S, Stupnitskii A. V, Pankratova N. V. et al. Orthodontic Patients Posterior Teeth Periodontium Hemodynamics Upon Applying Niti Wires of Different Cross-Sections // EC DENTAL SCIENCE. 2019 19.4. P. 755-765

533. Pirilä-Parkkinen K., Löppönen H., Nieminen P., et al. Validity of upper airway assessment in children: a clinical, cephalometric, and MRI study // Angle Orthod. 2011. Vol. 81, № 3. P. 433-9.

534. Pliska A., Schiavon L., Brunello G. et al. Accuracy of Two Variants of 3D-Printed Insertion Guides for Orthodontic Mini-Implants: An Ex Vivo Study in Human Cadavers // Applied Sciences. 2023. Vol. 13(16). P. 9162.

535. Poorsattar-Bejeh Mir A. Haghanifar S., Rahmati-Kamel M. Individual scoring and mapping of hard and soft tissues of the anterior hard palate for orthodontic miniscrew insertion // J Investig Clin Dent. 2017. Vol. 8(1).

536. Pouliezou I., Gravia A.P. Digital Model in Orthodontics: Is It Really Necessary for Every Treatment Procedure? A Scoping Review // Oral. 2024. Vol. 4. P. 243-262.

537. Prakash O., Verma S.K., Jha A.K. et al. Surgery-First Approach for Dentofacial Deformity: A Systematic Review // Cureus. 2023 Feb 16. Vol. 15(2). P. e35085.

538. Prpic V., Spehar F., Stajdohar D. et al. Mechanical Properties of 3D-Printed Occlusal Splint Materials // Dent J (Basel). 2023 Aug 18. Vol. 11(8). P. 199.
539. Qian Y. et al. Comparison of the accuracy of 2D and 3D cephalometry: a systematic review and meta-analysis // Australasian Orthodontic Journal. 2022. Vol. 38 No. 1. P. 130-144/
540. Qureshi T. The new age of ethical cosmetic dentistry: implementing the concept of progressive smile design. // Dentistry today. 2012. T. 31. № 10. C. 98-101.
541. Raaj V., Raina S., Raina R., Kumari M. Electromyographic Analysis of Masticatory and Accessory Muscles in Subjects with Implant-Supported Fixed Prostheses: A Three-Arm Comparative Clinical Study // Cureus. 2023 Jan. Vol. 19. No. 15(1). P. e33969.
542. Rafiei E., Haerian A., Fadaei Tehrani P, Shokrollahi M. Agreement of in vitro orthodontic measurements on dental plaster casts and digital models using Maestro 3D ortho studio software .. Clin Exp Dent Res. 2022 Oct. Vol. 8(5). P. 1149-1157.
543. Raith S. Vogel E. P., Anees N., et al. Artificial Neural Networks as a powerful numerical tool to classify specific features of a tooth based on 3D scan data // Computers in Biology and Medicine. 2017. Vol. 80. P. 65-76.
544. Rajasekaran A., Chaudhari P.K. Integrated manufacturing of direct 3D-printed clear aligners // Sec. Systems Integration. 2023. Vol. 3. doi: 10.3389/fdmed.2022.1089627
545. Rao A. Badavannavar A., Acharya A. An orthodontic analysis of the smile dynamics with videography (2021) // Journal of Oral Biology and Craniofacial Research. 2021. Vol. 11. No 2. P. 174-179.
546. Rao G.K.L., Srinivasa A.C., Iskandar Y.H.P., Mokhtar N. Identification and analysis of photometric points on 2D facial images: A machine learning approach in orthodontics. Health Technol. 2019. Vol. 9. P. 715-724.

547. Raposo R. Peleteiro B., Paço M., Pinho T. Orthodontic camouflage versus orthodontic-orthognathic surgical treatment in class II malocclusion: a systematic review and meta-analysis // International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. 2018. Vol. 47(4). P. 445-455.
548. Rasperini G., Acunzo R., Cannalire P., Farronato G. Influence of Periodontal Biotype on Root Surface Exposure During Orthodontic Treatment: A Preliminary Study // The International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry. 2017. Vol. 35. № 5. P. 655-67.
549. Renugalakshmi A., Vinothkumar T.S., Bokhari A.M. et al. Prevalence of Dental Anomalies and Its Role in Sex Estimation among Children of Jazan Region, Saudi Arabia // Children (Basel). 2023 Apr 21. Vol. 10(4). P. 759.
550. Richert R., Goujat A., Venet L. et al. Intraoral Scanner Technologies: A Review to Make a Successful Impression // J Healthc Eng. 2017. Vol. 2017. P. 8427595.
551. Riley J.L., 3rd, Gordan V.V., Hudak-Boss S.E. et al. Concordance between patient satisfaction and the dentist's view: Findings from The National Dental Practice-Based Research Network // J. Am. Dent. Assoc. 2014. P. 145. P. 355-362.
552. Roberts-Harry D., Sandy J. Orthodontics. Part 2: Patient assessment and examination I / D. Roberts-Harry, // British Dental Journal 2003 195:9. 2003. Vol. 195. № 9. P. 489-493.
553. Rodriguez G.L.C., Cambron Z.H., Vargas R.M. Relationship between facial golden ratio and malocclusion in Mexican patients who attended the Orthodontics Clinic at Facultad de Odontologí'a de la Universidad Tecnolo'gica de Me'xico during 2009 with facial aesthetics criteria evaluated with Marquardt mask // Revista Mexicana de Ortodoncia. 2014. Vol. 2. P. 9-17
554. Ronsivalle V., Venezia, P., Bennici, O. et al. Accuracy of digital workflow for placing orthodontic miniscrews using generic and licensed open

systems. A 3d imaging analysis of non-native .stl files for guided protocols // BMC Oral Health. 2023. Vol. 23. P. 494.

555. Roslan A.A., Rahman N.A., Alam M.K. Dental anomalies and their treatment modalities/planning in orthodontic patients // J orthod Sci 2018. Vol. 7. P. 16.

556. Rucha S., Sowmya N. K., Raison T., Dhoom Singh M. Periodontal biotype: Basics and clinical considerations // Journal of Interdisciplinary Dentistry. 2016. Vol. 6(1). P. 44-49.

557. Ryu J., Kim Y.H., Kim T.W., Jung S.K. Evaluation of artificial intelligence model for crowding categorization and extraction diagnosis using intraoral photographs // Sci. Rep. 2023. Vol. 13. P. 5177.

558. Saccomanno S., Saran S., Vanella V. et al. The Potential of Digital Impression in Orthodontics. Dent J (Basel). 2022 Aug 8. Vol. 10(8). P. 147.

559. Sánchez-Riofrío D., Viñas M., Ustrell-Torrent J.M. CBCT and CAD-CAM technology to design a minimally invasive maxillary expander // BMC Oral Health. 2020. Vol. 20. 10.1186/s12903-020-01292-3.

560. Saravi B., Ilbertz J., Vach K. et al. Accuracy of Computerized Optical Impression Making in Fabrication of Removable Dentures for Partially Edentulous Jaws: An In Vivo Feasibility Study // J Funct Biomater. 2023 Sep 5. Vol. 14(9). P. 458.

561. Schlenz M.A., Schubert V., Schmidt A. et al. Digital versus Conventional Impression Taking Focusing on Interdental Areas: A Clinical Trial. Int J Environ Res Public Health. 2020 Jun 30;17(13):4725.

562. Schlenz M.A., Schupp B., Schmidt A. et al. New Caries Diagnostic Tools in Intraoral Scanners: A Comparative in Vitro Study to Established Methods in Permanent and Primary Teeth // Sensors 2022. Vol. 22. P. 2156

563. Sedtasuppana A., Nunthayanon K., Prasitsak T., et al. Comparison of Arch Widths Measurements Made on Digital and Plaster Models // Naresuan University Journal: Science and Technology 2017. Vol. (25).

564. Seo H., Kim J., Yu C., Lim H. Intra-Rater and Inter-Rater Reliability Analysis of Muscle-Tone Evaluation Using a Myotonometer for Children with Developmental Disabilities // *Healthcare* 2023. Vol. 11. P. 782.
565. Sereewisai B., Chintavalakorn R, Santiwong P et al. The accuracy of virtual setup in simulating treatment outcomes in orthodontic practice: a systematic review // *BDJ Open*. 2023 Aug 28. Vol. 9(1). P. 41.
566. Sharma S., Kunda K. Evolution of orthodontic brackets. – Mauritius: Lambert Academic Publishing, 2020. – 281 p.
567. Shkarin V.V., Grinin V.M., Halfin R.A., Domenyuk D.A. Specific features of transversal and vertical parameters in lower molars crowns at various dental types of arches // *Archiv EuroMedica*. 2019. Vol. 9(2). P. 174-181.
568. Subramanian A.K., Chen Y., Almalki A. et al. Cephalometric Analysis in Orthodontics Using Artificial Intelligence-A Comprehensive Review // *Biomed Res Int*. 2022 Jun 16. Vol. 2022. P. 1880113.
569. Sundareswaran S., Ramakrishnan R. The Facial Aesthetic index: An additional tool for assessing treatment need // *J Orthod Sci*. 2016 Apr-Jun. Vol. 5(2). P. 57-63.
570. Surendran A., Daigavane P., Shrivastav S., et al. The Future of Orthodontics: Deep Learning Technologies // *Cureus*. 2024. Vol. 16(6). P. e62045.
571. Szabó R.M., Buzás N., Braunitzer G. et al. Factors Influencing Patient Satisfaction and Loyalty as Perceived by Dentists and Their Patients. *Dent J (Basel)*. 2023 Aug 28;11(9):203.
572. Talaat S., Kaboudan A., Talaat W. et al. The validity of an artificial intelligence application for assessment of orthodontic treatment needs from clinical images // *Semin. Orthod*. 2021. Vol. 27. P. 164-171.
573. Tamimi D. Specialty Imaging: Temporomandibular Joint E-Book / D. Tamimi, D.C. Hatcher. – Elsevier Health Sciences, 2016. – 800 p.
574. Tang Y., Zhang Y., Meng Z. et al. Accuracy of additive manufacturing in stomatology // *Front Bioeng Biotechnol*. 2022 Aug 16. Vol. 10. P. 964651.

575. Thurzo A., Strunga M., Havlínová R. et al. Smartphone-Based Facial Scanning as a Viable Tool for Facially Driven Orthodontics? *Sensors* (Basel). 2022 Oct 12. Vol. 22(20). P. 7752.
576. Traebert E. F., Zanini A., Nunes R.D., Traebert J. Nutritional and non-nutritional habits and occurrence of malocclusions in the mixed dentition // *An Acad Bras Cienc*. 2020. Vol. 17. № 92. P. e20190833.
577. Trifan D. Indices and diagnostic guidelines for patients with transverse malocclusion: Summary of the thesis of doctor habilitate in medical sciences: 323.01. – Stomatology. Chişinău, 2023. – 31 p.
578. Tsolakis I.A., Panos P., Papadopoulos M.A. Accuracy of the ClinCheck® prediction outcome for orthodontic treatment with Invisalign. A 3D digital casts study // Conference: International Symposium, Greek Orthodontic Society. 2022. 2 p.
579. Vaid N.R. Artificial Intelligence (AI) driven orthodontic care: A quest toward utopia? // *Seminars in Orthodontics*. 2021. Vol. 27. № 2. P. 57-61.
580. van der Meer W.J., Andriessen F.S., Wismeijer D., Ren Y. Application of intra-oral dental scanners in the digital workflow of implantology // *PLoS One*. 2012. Vol. 7(8). P. e43312.
581. van Groningen L., Sips R., Wismeijer D., Hassan B. Comparing 2 Cone Beam Computed Tomography Devices for the Transfer Accuracy of a Laboratory-Based Guided Surgery System In Vitro. *Implant Dent*. 2016 Apr. Vol. 25(2). P. 222-6.
582. Vandenberghe B. The digital patient – Imaging science in dentistry // *J Dent*. 2018. T. 74 Suppl 1. P. S21-S26.
583. Vasegh Z., Safi Y., Azar M.S. et al. Assessment of bony changes in temporomandibular joint in patients using cone beam computed tomography – a cross-sectional study // *Head Face Med*. 2023. Vol. 19. P. 47.

584. Vasilakos G., Koniaris A., Wolf M. et al. Early anterior crossbite correction through posterior bite opening: A 3D superimposition prospective cohort study // *European Journal of Orthodontics*. 2018. Vol. 40. № 4. P. 364-371.
585. Vergara C. et al. Concordance of the vestibular bone thickness at the level of point a between teleradiography and cone beam computed tomography // *Journal of Oral Research*, [S. l.]. 2023. Vol. 12. No. 1. P. 63-74.
586. Verhelst P.J., Smolders A., Beznik T. et al. Layered deep learning for automatic mandibular segmentation in cone-beam computed tomography // *J Dent*. 2021 Nov. Vol. 114. P. 103786.
587. Virji S.A., Ng E.T., Jayachandran S., Heit T.C. A case study on myofunctional therapy and malocclusions created by oral habits // *Can J Dent Hyg*. 2023 Feb 1. Vol. 57(1). P. 61-68.
588. Wada Y., Yoshimura H., Mikami I. et al. Implant Site Development by Horizontal Tooth Movement to an Esthetic Area: A Case Report // *Int J Periodontics Restorative Dent*. 2015. Vol. 35(5). P. 697-705.
589. Waldman A. The New Era of Personalized Orthodontics: 3D Printed Braces. – 09.11.2023 // *Oral Health*. – ULR: <https://www.oralhealthgroup.com/features/the-new-era-of-personalized-orthodontics-3d-printed-braces/>
590. Waldman A., Garvan C.S., Yang J., Wheeler T.T. Clinical efficiency of LightForce 3D-printed custom brackets. *J Clin Orthod JCO*. 2023. 57(5). P. 274-282.
591. Wang H., Qiao X., Qi S. et al. Effect of adenoid hypertrophy on the upper airway and craniomaxillofacial region // *Transl Pediatr*. 2021. Vol. 10. № 10. P. 2563-2572.
592. Weckmann J., Scharf S., Graf I. et al. Influence of attachment bonding protocol on precision of the attachment in aligner treatments // *J Orofac Orthop*. 2020 Jan. Vol. 81(1). P. 30-40

593. Weir T. Clear aligners in orthodontic treatment // Australian Dental Journal. 2017. Vol. 62. P. 58-62.
594. Westerlund A., Tancredi W., Ransjö M., et al. Digital casts in orthodontics: a comparison of 4 software systems // Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2015 Apr. Vol. 147(4). P. 509-16.
595. White D.W., Julien K.C., Jacob H. et al. Discomfort associated with Invisalign and traditional brackets: A randomized, prospective trial // Angle Orthod. 2017. №87. P. 801-808.
596. Whyte A.M., McNamara D., Rosenberg I., Whyte A.W. Magnetic resonance imaging in the evaluation of temporomandibular joint disc displacement – a review of 144 cases // International journal of oral and maxillofacial surgery. 2006. Vol. 35. № 8. P. 696-703.
597. Willi A., Patcas R., Zervou S.K. et al. Leaching from a 3D-printed aligner resin // Eur J Orthod. 2022. P. cjac056.
598. Woo H., Jha N., Kim Y-J., Sung S-J. Evaluating the accuracy of automated ortho-dontic digital setup models // Semin Orthodontics. 2023. Vol. 29. P. 60-67.
599. Yang X., Li C., Bai D. et al. Treatment effectiveness of Frankel function regulator on the class III malocclusion: a systematic review and meta-analysis // Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop. 2018. Aug., Vol. 146(2). P. 143-154.
600. Yuzbasioglu E., Kurt H., Turunc R., Bilir H. Comparison of digital and conventional impression techniques: evaluation of patients' perception, treatment comfort, effectiveness and clinical outcomes // BMC Oral Health. 2014 Jan 30. Vol. 14. P. 10.
601. Zaragoza Ballester A., Ferrando Cascales Á., Barrera Mora J.M. et al. Soft- and Hard-Tissue Thicknesses in Patients with Different Vertical Facial Patterns and the Transverse Deficiencies, An Integrated CBCT-3D Digital Model Analysis. // J Clin Med. 2023 Feb 9. Vol. 12(4). P. 1383.

602. Zarbakhsh A., Jalalian E., Samiei N. et al. Accuracy of Digital Impression Taking Using Intraoral Scanner versus the Conventional Technique. *Front Dent.* 2021 Feb 10. Vol. 18. P. 6.
603. Zhang, M., Ning, N., Hong, Y. et al. Digital working process in diagnosis, treatment planning and fabrication of personalized orthodontic appliances // *Digital Medicine.* 2023. Vol. 9(2).
604. Zheng, D.H., Wang, X.X., Su, Y.R. et al. Assessing changes in quality of life using the Oral Health Impact Profile (OHIP) in patients with different classifications of malocclusion during comprehensive orthodontic treatment // *BMC Oral Health.* 2015. Vol. 15. P. 148.
605. Zimmermann M., Mehl A. Virtual smile design systems: a current review // *International journal of computerized dentistry.* 2015. T. 18. № 4. C. 303-17.
606. Zinelis S., Panayi N., Polychronis G. et al. Comparative analysis of mechanical properties of orthodontic aligners produced by different contemporary 3D printers. *Orthod Craniofac Res.* 2022. Vol. 25. P. 336-41.